

Avaliação do impacto do solar térmico para produção de AQS e apoio à Climatização no âmbito da nova Regulamentação

Duarte de Bragança e Borges

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. José Luís Alexandre



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2008

À Sofia

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo avaliar o impacto energético da inclusão do solar térmico para produção de água quente sanitária e apoio aos sistemas energéticos de aquecimento e arrefecimento ambiente em edifícios residenciais, no âmbito do novo Sistema de Certificação Energética (Decreto-Lei nº 78/2006 e nº 80/2006) implementado em Portugal.

Sendo na actual legislação obrigatória a inclusão de sistemas solares térmicos em edifícios residenciais, determinou-se para cada tipologia de edifícios, unifamiliares e multifamiliares, a influência em termos de desempenho energético do edifício, da inclusão do solar térmico. Foram analisadas e comparadas soluções genéricas de fornecimento de energia solar térmica para aquecimento de água sanitária e apoio aos equipamentos de climatização. Também se estudou a disponibilidade física do espaço necessário à inclusão da tecnologia abordada, e comparou-se as várias tecnologias de colectores solares térmicos existentes no mercado nacional em termos de impacte energético, à luz da nova Regulamentação.

O impacto no consumo de energia primária dos edifícios foi avaliado para as zonas climáticas diferenciadas no RCCTE. Os casos de estudo são habitações típicas em Portugal, e considerou-se que são edifícios novos e que observam o SCE, obtendo assim uma das 4 classificações possíveis (A+, A, B e B-).

Foram utilizados os softwares Solterm, programa de análise de desempenho de sistemas solares especialmente concebido para as condições climáticas e técnicas de Portugal, e TRNSYS, de forma a modelar termicamente os edifícios em estudo através de uma simulação dinâmica multizona, e obter as solicitações climáticas do edifício.

Evaluation of the solar thermal systems impact for HDW production and space heating and cooling, concerning the new energetic Law

Abstract

The work's objective was to evaluate the energy impact of including solar thermal systems to produce hot domestic water and in supporting the climatization energy systems in residential buildings, in view of the new Energy Certification System (Decreto-Lei nº 78/2006 e nº 80/2006), implemented in Portugal.

Being, in light of the current legislation, obligatory the inclusion of thermal solar systems in residential buildings, it has been determined, for each building topology, both (uni-family and multi-family), the influence of the inclusion of thermal solar systems in terms of energy performance. Test and comparisons were made of generic solar thermal solutions for the heating of domestic hot water and support of the climatization (hot and cold generating equipment) systems. It was also studied the physical availability in terms of space to include the forementioned technology, and several solar thermal technologies available in the national market were compared, in terms of energy impact regarding the new regulation.

The primary energy consumption in buildings was evaluated for all climate zones differentiated in the RCCTE. The case studies are made up of typical portuguese housings. The buildings were considered to be new and in accordance with SCE, and so having obtained one of four possible classifications (A⁺, A, B e B⁻).

The software used is Solterm, an solar systems performance analysis software, specifically conceived for Portugal's technological and technical conditions and also TRNSYS, to thermically model the buildings being studied in the form of a multizone dynamic simulation.

Agradecimentos

Termino este trabalho deixando os meus agradecimentos a todos aqueles que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para a sua realização.

Ao Prof. José Luis Alexandre, por todo o apoio e orientação, e pelos níveis de exigência e qualidade que colocou para a execução deste trabalho.

Aos meus pais, que me deram um apoio incondicional nesta etapa da minha vida.

À Sofia, por todo o incentivo.

A todos os colegas que conheci durante este ano na FEUP, pelo seu companheirismo e boa disposição, proporcionando-me uma agradável passagem por esta Instituição.

Índice de conteúdos

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Contexto energético europeu e nacional	17
1.2	Energia solar em Portugal - uma perspectiva histórica.....	19
1.3	Mercado solar térmico em Portugal	21
1.4	RCCTE.....	23
1.4.1	Consumos Energéticos dos Edifícios.....	23
1.4.2	Divisão Climática	24
1.4.3	Água quente sanitária (AQS).....	25
1.4.4	Método de cálculo do N_{ac} e do N_a	27
1.4.5	Método de cálculo do N_{tc} e do N_t	28
1.4.6	Requisitos mínimos de qualidade térmica para a envolvente dos edifícios.....	30
1.4.7	Classificação Energética	31
2	FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DA ENERGIA SOLAR.....	32
2.1	Constante solar, ângulo solar, espectro solar e radiação solar	32
2.2	Aproveitamento da energia solar	34
2.2.1	Colectores planos	34
2.2.2	Cobertura selectiva	35
2.2.3	Colectores Concentradores	35
2.2.4	Colectores de tubos de vácuo.....	36
2.2.5	Desempenho do colector.....	37
2.3	Componentes do Sistema.....	38
2.4	Armazenamento de energia em sistemas solares	40
2.4.1	Consumos.....	40
2.5	Aquecimento de água.....	41
2.5.1	Sistemas com circulação natural.....	41
2.5.2	Sistemas com circulação forçada.....	42
2.6	Sistema solar térmico para climatização.....	43
2.7	Sombreamentos entre filas de colectores	44
3	CASOS DE ESTUDO	45

3.1 Habitação unifamiliar	45
3.1.1 Caracterização geométrica.....	45
3.1.2 Caracterização da envolvente	47
3.1.3 Perfis de consumo	49
3.1.3.1 Ganhos térmicos resultantes de fontes internas	49
3.1.3.2 Águas quentes sanitárias	49
3.1.4 Sistema de climatização.....	50
3.2 Habitação multifamiliar	50
3.2.1 Caracterização geométrica.....	50
3.2.2 Caracterização da envolvente	52
3.2.3 Sistema de climatização.....	54
3.3 Sistemas solares térmicos	54
3.3.1 Sistema solar térmico para produção de AQS do edifício unifamiliar	56
3.3.1.1 Sistema solar com circulação forçada.....	56
3.3.1.2 Sistema solar com circulação natural.....	57
3.3.2 Sistema solar térmico para produção de AQS no edifício multifamiliar	58
3.3.3 Sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização do edifício multifamiliar	61
3.3.3.1 Descrição do controlo do sistema	63
3.3.3.2 Descrição dos parâmetros relevantes à análise energética do sistema.....	64
3.4 Programas de simulação utilizados.....	66
3.4.1 Solterm 5 – descrição do software	66
3.4.2 TRNSYS 16 – descrição do software	67
4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	70
4.1 Aplicação do RCCTE à habitação unifamiliar.....	70
4.1.1 Zonas climáticas estudadas	70
4.1.2 Coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ).....	71
4.1.3 Factor de forma.....	72
4.1.4 Coeficientes de transmissão térmica linear.....	72
4.1.5 Taxa de renovação de ar horária nominal	73
4.1.6 Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento.....	73
4.1.7 Necessidades energéticas para produção de AQS	74
4.1.8 Necessidades globais de energia primária	76

4.1.9 Classificação energética.....	76
4.2 Aplicação do RCCTE à habitação multifamiliar	77
4.2.1 Localizações estudadas e radiação solar disponível	77
4.2.2 Coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ).....	79
4.2.3 Factor de forma.....	79
4.2.4 Coeficientes de transmissão térmica linear.....	79
4.2.5 Taxa de renovação de ar horária nominal.....	80
4.2.6 Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento.....	80
4.2.7 Necessidades energéticas para produção de AQS	81
4.2.8 Necessidades globais de energia primária	82
4.3 Simulação dinâmica multizona do edifício multifamiliar.....	85
4.3.1 Resultados das simulações com o TRNSYS.....	86
4.4 Análise energética do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização do edifício multifamiliar	90
4.5 Avaliação da influência do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização, no desempenho energético do edifício multifamiliar, ao abrigo do RCCTE ..	97
5 CONCLUSÕES.....	100
Bibliografia.....	102
ANEXO A: Características e valores de referência dos Concelhos	104
ANEXO B: Valores médios da intensidade da radiação solar para a estação convencional de arrefecimento, nas zonas climáticas estudadas.....	105
ANEXO C: Valores de entrada e saída (retirado do ficheiro *.inf criado pelo TRNBuild) do bloco “Type 56” utilizado na simulação do edifício multifamiliar	106
ANEXO D: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime “free float” ao longo do ano, nas localizações estudadas.....	108
ANEXO E: Variação das necessidades energéticas para climatização dos apartamentos de cada um dos pisos do edifício multifamiliar, nas localizações estudadas	112
ANEXO F: Variação das necessidades energéticas para climatização do edifício multifamiliar, nas localizações estudadas.....	115
ANEXO G: Necessidades energéticas totais (AQS e climatização) do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através do solar térmico com uma área instalada de 64 m ² de SPS e STV, nas localizações estudadas.....	118
ANEXO H - Contributo solar mensal de AQS, aquecimento e arrefecimento, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando uma área de 64 m ² de SPS e STV, instalados no edifício multifamiliar nas localizações estudadas	124

Lista de figuras

Figura 1: Programa “Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios” – Conselho de Ministros n.º 80/2006	18
Figura 2: Mapa de quantidade de irradiação solar [kWh/m ²] na Europa [22].....	22
Figura 3: Zonas climáticas de Verão em Portugal continental	25
Figura 4: Zonas climáticas de Inverno em Portugal continental	25
Figura 5: “Exposição solar adequada” definida no RCCTE	26
Figura 6: Exemplo de conversão entre energia primária e energia útil [23].....	29
Figura 7: Espectro da radiação solar que chega à superfície da Terra (ao nível do mar) [6].....	32
Figura 8: Componentes da radiação solar [7]	33
Figura 9: Ângulos solares relativamente a uma superfície inclinada [9]	34
Figura 10: Secção através de um colector plano [7]	35
Figura 11: Efeito dos raios solares sobre a superfície dum colector CPC [6]	36
Figura 12: Secção transversal de um colector de tubos de vácuo com circulação em "heat pipe" [7]	37
Figura 13: Exemplo de uma instalação solar térmica em termossifão, para AQS, numa habitação unifamiliar	42
Figura 14: Exemplo de uma instalação solar térmica com circulação forçada, para AQS, numa habitação unifamiliar	42
Figura 15: Sistema solar térmico para aquecimento e arrefecimento ambiente [9].....	43
Figura 16: Cálculo de sombreamentos entre filas de colectores [6].....	44
Figura 17: Habitação unifamiliar - fachada sul.....	46
Figura 18: Habitação unifamiliar - fachada norte	46
Figura 19: Planta da habitação unifamiliar	46
Figura 20: Parede dupla em alvenaria de tijolo vazado [13].....	47
Figura 21: Planta do rés-de-chão do edifício multifamiliar	51
Figura 22: Obstrução horizontal de 3º considerada nos sistemas solares térmicos estudados	54
Figura 23: Esquema do sistema solar térmico (c/ circulação forçada) para AQS no edifício unifamiliar [24]	56
Figura 24: Esquema do sistema solar térmico (c/ circulação natural) para AQS no edifício unifamiliar [17]	58
Figura 25: Esquema do sistema solar térmico para produção centralizada de AQS no edifício multifamiliar [17].....	59
Figura 26: Esquema de princípio do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio aos sistemas de climatização do edifício multifamiliar	62
Figura 27: Exemplo de uma configuração utilizada no Solterm - sistema solar térmico para produção de AQS, apoio ao aquecimento ambiente e aumento da temporada de utilização da piscina exterior	67
Figura 28: Interface visual do Simulation Studio do TRNSYS	68
Figura 29: Interface visual do TRNBuild do TRNSYS	69

Figura 30: Mapa de Portugal com os Concelhos e zonas climáticas correspondentes, onde foi considerada a localização da habitação unifamiliar para aplicação do RCCTE [1].....	71
Figura 31: N_{ac} para os 4 tipos de sistemas de colectores solares.....	75
Figura 32: Energia solar desperdiçada nos 4 sistemas estudados	75
Figura 33: N_{tc}/N_t para os 4 tipos de instalação solar térmica em habitação unifamiliar.....	76
Figura 34: Classes energéticas atribuídas nos 4 tipos de instalação solar térmica em habitação unifamiliar	77
Figura 35: Localização dos Concelhos para análise da habitação multifamiliar	78
Figura 36: Variação mensal da irradiação solar diária horizontal	78
Figura 37: N_{ac} em função do número de pisos em cada FA do edifício multifamiliar.....	82
Figura 38: N_{tc}/N_t para as FA's do último piso do edifício multifamiliar.....	84
Figura 39: Esquema de simulação com o TRNSYS, do edifício multifamiliar	86
Figura 40: Necessidades energéticas de climatização das FA's do edifício multifamiliar, em Castelo Branco	87
Figura 41: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Castelo Branco...	87
Figura 42: Comparativo das necessidades energéticas do edifício multifamiliar nas localizações estudadas	89
Figura 43: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Castelo Branco	91
Figura 44: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Castelo Branco.....	91
Figura 45: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Castelo Branco.....	92
Figura 46: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Castelo Branco	92
Figura 47: Necessidades energéticas de climatização e poupanças obtidas através do solar térmico com SPS no edifício multifamiliar	93
Figura 48: Necessidades energéticas de climatização e poupanças obtidas através do solar térmico com STV no edifício multifamiliar	93
Figura 49: Energia desperdiçada pelo solar térmico com SPS e STV no edifício multifamiliar	94
Figura 50: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, em Faro à esquerda, e Évora à direita	95
Figura 51: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, em Coimbra à esquerda, e Lisboa à direita	95
Figura 52: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, em Bragança	96
Figura 53: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, no Porto à esquerda, e Castelo Branco à direita	96
Figura 54: Variação de N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar, em relação à área colectora, com SPS à esquerda, e STV à direita	97
Figura 55: N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar, com o solar térmico com área de 32 m ² a funcionar para AQS e AQS + climatização, com SPS à esquerda e STV à direita	98

Figura 56: N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar em relação à eficiência de conversão do sistema de preparação de AQS, com SPS à esquerda, e STV à direita	99
Figura 58: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Lisboa	108
Figura 57: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Coimbra.	108
Figura 59: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Faro	109
Figura 60: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Évora	109
Figura 61: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", no Porto	110
Figura 62: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Castelo Branco	110
Figura 63: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Bragança	111
Figura 64: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Coimbra	112
Figura 65: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Lisboa	112
Figura 66: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Faro	113
Figura 67: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Évora.....	113
Figura 68: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, no Porto.....	114
Figura 69: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Bragança.....	114
Figura 70: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Coimbra	115
Figura 71: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Lisboa.....	115
Figura 72: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Faro.....	116
Figura 73: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Évora.....	116
Figura 74: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, no Porto.....	117
Figura 75: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Bragança	117
Figura 76: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Coimbra.....	118
Figura 77: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Coimbra	118
Figura 78: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Lisboa.....	119
Figura 79: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Lisboa	119
Figura 80: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Faro.....	120
Figura 81: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Faro	120
Figura 82: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Évora	121

Figura 83: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Évora	121
Figura 84: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, no Porto	122
Figura 85: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, no Porto	122
Figura 86: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Bragança	123
Figura 87: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Bragança	123
Figura 88: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Coimbra	124
Figura 89: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Coimbra	124
Figura 90: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Lisboa	125
Figura 91: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Lisboa.....	125
Figura 92: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Faro	125
Figura 93: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Faro.....	125
Figura 94: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Évora	125
Figura 95: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Évora.....	125
Figura 96: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar no Porto.....	125
Figura 97: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar no Porto	125
Figura 98: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Bragança	125
Figura 99: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Bragança.....	125

Lista de tabelas

Tabela 1: Número convencional de ocupantes em função da tipologia da FA.....	28
Tabela 2: Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos [U - W/m ² .°C]	30
Tabela 3: Factores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem	30
Tabela 4: Escala utilizada na classificação energética dos edifícios sujeitos ao RCCTE	31
Tabela 5: Habitação unifamiliar: dimensões dos espaços do edifício e respectivas áreas de envidraçados	47
Tabela 6: Envolvente opaca do edifício unifamiliar	48
Tabela 7: Perfil de consumo de AQS da habitação unifamiliar	50
Tabela 8: Habitação multifamiliar: dimensões dos espaços dos apartamentos e respectivas áreas de envidraçados	51
Tabela 9: Envolvente opaca exterior e interior do edifício multifamiliar	53
Tabela 10: Propriedades do fluido térmico [mistura água + propileno-glicol] considerado na simulação [8]	55
Tabela 11: Características dos colectores e da instalação com circulação forçada no edifício unifamiliar	57
Tabela 12: Características da instalação solar térmica com "kit termossifão" no edifício unifamiliar ..	58
Tabela 13: Características dos colectores e da instalação para produção de AQS no edifício multifamiliar	60
Tabela 14: Características do depósito inercial para as várias situações estudadas	64
Tabela 15: Propriedades hidráulicas da instalação com colectores planos selectivos	65
Tabela 16: Propriedades hidráulicas da instalação com colectores de tubos de vácuo	65
Tabela 17: Coeficientes de transmissão térmica linear no edifício unifamiliar	73
Tabela 18: Necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento e limites correspondentes, para o edifício unifamiliar, nas várias localizações estudadas	74
Tabela 19: Zonas climática da habitação multifamiliar	78
Tabela 20: Factor de forma para cada um dos pisos do edifício multifamiliar	79
Tabela 21: Coeficientes de transmissão térmica linear [Ψ] no edifício multifamiliar	80
Tabela 22: Necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento, e valores de referência correspondentes, para o edifício multifamiliar.....	81
Tabela 23: Variação do F_h em cada piso, variando o número total de pisos do edifício multifamiliar ..	83
Tabela 24: Classes de exposição ao vento das fachadas das FA's do edifício multifamiliar	84
Tabela 25: Resultados obtidos através do RCCTE e do TRNSYS	88
Tabela 26: Cargas térmicas máximas de aquecimento e arrefecimento no edifício multifamiliar	89

Nomenclatura

Caracteres Gregos

τ	coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não-aquecidos
$(\tau\alpha)_0$	produto da transparência τ da cobertura pela absorptância α do absorvedor a um ângulo de incidência θ
ψ	coeficiente de transmissão térmica linear [W/m.°C]
ρ	massa específica [kg/m ³]
η_o	rendimento óptico
μ	coeficiente de viscosidade dinâmica [Pa.s]
ν	coeficiente de viscosidade cinemática [m ² /s]
δ	declinação solar (°)
σ	constante de Stefan-Boltzmann [5,6697.10 ⁻⁸ W/m ² .K ⁴]
Φ	diâmetro [mm]
η_a	eficiência de conversão do sistema de preparação de AQS
η_i	eficiência nominal do equipamento utilizado no sistema de aquecimento
η_a	eficiência nominal do equipamento utilizado no sistema de arrefecimento
ΔT	diferença de temperaturas [°C]

Caracteres Romanos

A_{ext}	somatório das áreas da envolvente exterior [m ²]
A_{int}	área de cada elemento da envolvente interior [m ²]
A_p	área útil de pavimento [m ²]
a_1	coeficiente global de perdas linear de colector solar [W/m ² .K]
a_2	coeficiente global de perdas quadrático de colector solar [W/m ² .K ²]
c_p	calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]
d	distância [m]
e	emitância
E_{ren}	relativo à energia renovável que não solar térmico, para N_{ac} [kWh/ano]
E_{solar}	relativo à contribuição do solar térmico para N_{ac} [kWh/ano]
f	fracção solar
F_h	factor de sombreamento do horizonte
FF	factor de forma de uma fracção autónoma
F_{pu}	factor de conversão entre energia útil e energia primária [kgep/kWh]
F_{pua}	factor de conversão de energia útil para primária relativo à AQS [kgep/kWh]
F_{pui}	factor de conversão de energia útil para primária em aquecimento [kgep/kWh]
F_{puv}	factor de conversão de energia útil para primária em arrefecimento [kgep/kWh]
g_{\perp}	factor solar dos envidraçados
I_t	indicador de inércia térmica interior dum edifício [kg/m ²]

I_{t0}	irradiação total no colector [W/m^2]
L	comprimento [m]
lat	latitude do local ($^\circ$)
\dot{L}_W	taxa de adição de calor sensível [kW]
\dot{m}	caudal [kg/s]
M_{AQS}	consumo médio diário de referência de AQS [litros]
N_{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_{vc}	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_{ac}	Necessidades nominais anuais de energia para produção de AQS [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_{tc}	Necessidades globais anuais de energia primária [$\text{kgep/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_i	valor limite de N_{ic} [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_v	valor limite de N_{vc} [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_a	valor limite de N_{ac} [$\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$]
N_t	valor limite de N_{tc} [$\text{kgep/m}^2\cdot\text{ano}$]
n_d	número anual de dias de consumo de AQS [n.º de dias/ano]
Q_a	energia útil despendida com sistemas convencionais de AQS [kWh/ano]
q_u	energia útil absorvida pelo colector solar por unidade de área de abertura [W/m^2]
R	resistência térmica superficial [$\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$]
Re	número de Reynolds
R_{ph}	taxa de renovação de ar horária nominal [h^{-1}]
U	coeficiente de transmissão térmica superficial de um elemento [$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$]
U_L	coeficiente global de perdas de calor do colector [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
X_j	factor de orientação para as diferentes exposições

Abreviaturas

AQS	água quente sanitária
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AVAC	aquecimento, ventilação e ar condicionado
CPC	concentrador parabólico composto
DER	Departamento de Energias Renováveis
DGE	Direcção Geral de Energia
DGGE	Direcção Geral de Energia e Geologia
EER	energy efficiency ratio
FA	fracção autónoma
GD	graus-dias
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PIB	Produto Interno Bruto
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PNAC	Plano Nacional de Alterações Climáticas
PTL	ponte térmica linear
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RGEU	Regime Geral das Edificações Urbanas
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética
SPES	Sociedade Portuguesa de Energia Solar
TSV	tempo solar verdadeiro
UE	União Europeia

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto energético europeu e nacional

A importância da utilização de fontes alternativas e renováveis de energia tem sofrido um crescimento assinalável nos últimos anos, muito devido à degradação das condições ambientais e climáticas provocadas pelo aumento sucessivo das emissões de poluentes para o meio ambiente, tendo como resultado imediato, o aquecimento global do planeta.

Grande parte da energia utilizada na União Europeia (UE) provém dos combustíveis fósseis, cujas reservas são finitas, e são uma das principais causas do aquecimento global do planeta. Uma parte significativa e crescente desta energia é importada de países não pertencentes à UE, tornando-a vulnerável a reduções no aprovisionamento ou a aumentos de preços sucessivos, como acontece actualmente. Até 2030, a dependência das importações de petróleo e de gás, poderá ascender, respectivamente, a 93 e 84%, se não houver uma reformulação do consumo de energia e diversificação das suas fontes. Para reduzir o impacto das alterações climáticas, esta diversificação é indispensável.

A política europeia da energia aborda vários vectores, que visam uma economia de baixo consumo de energia, mais segura, mais competitiva e sustentável. Reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência energética são um dos grandes objectivos da UE. Ao proporcionar a melhoria da eficiência energética, é possível contribuir de forma decisiva para a competitividade, a segurança do abastecimento e o respeito dos compromissos assumidos no âmbito do Protocolo de Quioto sobre as alterações climáticas. Existem grandes potenciais de redução, em especial nos sectores que consomem muita energia, como o da construção, das indústrias transformadoras, da conversão da energia, dos transportes e dos edifícios.

Portugal é um país com escassa incorporação de recursos energéticos próprios, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás). Tal situação de escassez conduz a uma elevada dependência energética do exterior, sendo totalmente dependente das importações de fontes primárias de origem fóssil, e com uma contribuição das energias hídrica (fortemente dependente das condições climáticas), eólica, solar e geotérmica, biogás, lenhas e resíduos, que importa aumentar. Portugal está assim perante uma reduzida diversificação da oferta energética primária, aliada à escassez de recursos próprios, que conduz a uma maior vulnerabilidade do sistema energético às flutuações dos preços internacionais, nomeadamente do preço do petróleo, exigindo esforços no sentido de aumentar a diversificação.

Desde o início da década de noventa, o consumo de energia final cresceu em média 3,2% ao ano [20], cerca de sete décimas acima da taxa de crescimento média do Produto Interno Bruto (PIB) registada no mesmo período. Desde 1990, verificou-se a existência de dois perfis de crescimento energético, um bastante acentuado, registado especialmente durante a segunda parte da década de noventa, e o actual perfil, com taxas de variação mais baixas, especialmente evidentes desde o ano 2001. Em termos de repartição do consumo por

sectores verifica-se que os sectores Indústria, Transportes e o agregado dos Sectores Residencial e Serviços se equivalem na quantidade de energia consumida anualmente.

Em Conselho de Ministros foi aprovado o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética – Portugal Eficiência 2015 [20], documento que engloba um conjunto alargado de programas e medidas consideradas fundamentais para que Portugal possa alcançar, e suplantar, os objectivos fixados no âmbito da referida directiva europeia. Anteriormente já haviam sido aprovados o Programa Nacional para as Alterações Climáticas e a Estratégia Nacional para a Energia, que também previam um conjunto alargado de medidas de eficiência energética, mas o novo Plano vem trazer uma maior ambição e coerência às políticas de eficiência energética, abrangendo todos os sectores e agregando as várias medidas entretanto aprovadas, e um conjunto alargado de novas medidas em 12 programas específicos.

Os edifícios residenciais, e de serviços, são hoje responsáveis por mais de 60% do consumo de electricidade, representando uma fracção importante das emissões relativas à produção de energia eléctrica com recurso a combustíveis fósseis. Neste sentido, no Plano Portugal Eficiência 2015, a área de Residencial e Serviços integra o programa de eficiência energética denominado “Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios”, que agrupa as medidas que resultam do processo de certificação energética nos edifícios, nomeadamente isolamentos, melhoria de vãos envidraçados e sistemas energéticos. O Programa visa melhorar o desempenho energético dos edifícios, através da melhoria da classe média de eficiência energética do parque edificado, mediante a implementação das orientações que regulam o SCE. A Figura 1 representa um resumo do Programa.

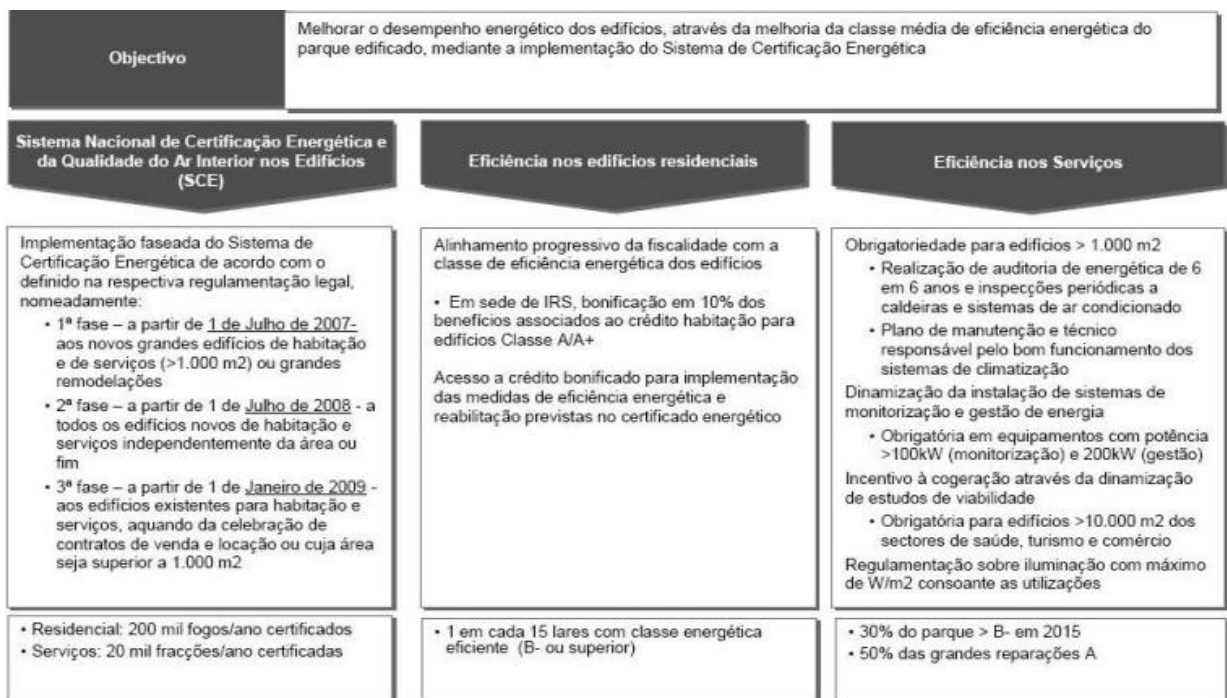


Figura 1: Programa “Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios” – Conselho de Ministros n.º 80/2006

O Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios é um dos três pilares sobre os quais assenta a nova legislação relativa à qualidade térmica dos edifícios em Portugal e que se pretende venha a proporcionar economias significativas de energia. Juntamente com os diplomas que vieram rever a regulamentação técnica aplicável neste âmbito aos edifícios de habitação (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril) e aos edifícios de serviços (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios – RSECE, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril), o SCE define regras e métodos para verificação da aplicação efectiva destes regulamentos às novas edificações, bem como, numa fase posterior, aos edifícios já construídos.

A face mais visível deste trabalho será o Certificado Energético e da Qualidade do Ar Interior emitido para cada edifício, ou fracção, e no qual estes serão classificados em função do seu desempenho numa escala predefinida de 9 classes (A⁺ a G). Este programa apresenta um potencial muito elevado de economias de energia em 2015, perspectivando-se alcançar economias da ordem dos 200 ktep [20], pela melhoria do desempenho energético dos novos edifícios a construir, mas também pela inclusão de medidas de reabilitação eficiente no parque edificado existente.

O SCE obriga a que as novas edificações ou grandes reabilitações, alcancem quotas mínimas por classes de eficiência. Adicionalmente, em sede de regulamentação específica poderão ser desenvolvidos mecanismos que potenciem a melhoria da classe energética nos edifícios. O objectivo é o de certificar, no âmbito de novos edifícios ou remodelações, 475 mil fogos residenciais até 2015, isto é, alcançar nesse ano uma quota de 10% do parque com classe energética B⁻ ou superior. Anualmente estimam-se que sejam edificados cerca de 50 mil novos fogos, que naturalmente constituirão a principal base da certificação energética.

Desta forma, o SCE pode conduzir a economias médias de 30% aos 40% no consumo de energia, resultantes de pelo menos cinco áreas: renováveis, isolamentos, pontes térmicas, superfícies envidraçadas e sombreamentos.

1.2 Energia solar em Portugal - uma perspectiva histórica

Quase um século antes da crise petrolífera de 1973, o cientista português Padre Manoel António Gomes, dedicou parte da sua vida à investigação e desenvolvimento de equipamentos para a conversão térmica da energia solar, tendo inventado diversos equipamentos inovadores de concentração solar. O reconhecimento mundial do seu trabalho surgiu em 1904, com a atribuição do Grand Prix da Exposição Universal de Saint Louis, EUA, ao seu invento Pirelióforo, um forno solar que atingiria temperaturas na ordem dos 3800 °C. Para este invento encontravam-se previstas diversas aplicações, tais como a produção de água potável em locais desérticos, a produção de vapor em processos industriais, a fusão de materiais ou a produção de fertilizantes.

Depois de um hiato de desenvolvimentos nesta área no nosso País, verifica-se um aumento da investigação nesta área na década de 60, através de trabalhos desenvolvidos pelo Doutor Salgado Prata, actual membro da SPES, no LNEC nas áreas da destilação solar, aquecimento de água para usos domésticos, cozinhas solares, refrigeração solar, secagem, propriedades de materiais sob a acção da radiação e da arquitectura solar. Ainda nessa década e em sintonia com a política israelita de utilização em larga escala de equipamento solar térmico, assistiu-se à importação de colectores solares térmicos por parte da primeira empresa portuguesa do sector, FALCONER, Lda., empresa que se encontra ainda em actividade, tendo sido o primeiro sistema solar instalado em Lisboa.

Na década de 70, e à semelhança do ocorrido em muitos outros países, foi dada uma maior atenção à energia solar. Sendo Portugal um dos países da OCDE com maior dependência energética, a crise petrolífera de 1973 teve um enorme impacto em todos os sectores da economia. Neste contexto, adesão de Portugal à Agência Internacional de Energia foi imediata, tendo sido reiniciados trabalhos de investigação na área da energia solar num novo laboratório do Estado, a partir do esforço conjunto de cientistas e engenheiros do Laboratório de Testes Mecânicos (LEM) da Direcção Geral de Combustíveis.

Com a mudança de regime político, em 1974, abriram-se portas para a discussão pública de temas políticos, económicos, sociais, culturais ou científicos, sendo a dependência energética do País e a abordagem à política a seguir no domínio da energia, um dos temas em discussão. No final dessa década o debate centra-se na energia nuclear e nas questões ambientais.

Os cientistas e engenheiros a desenvolver trabalho na área da energia solar no LEM, juntamente com investigadores doutorados no exterior e entretanto regressados ao nosso país, tiveram a oportunidade de participar nestas discussões, quer a nível nacional quer a nível internacional, abordando o futuro da energia em Portugal em seminários, congressos e artigos, dando especial ênfase aos importantes recursos existentes no nosso país, em contraposição com a enorme dependência de combustíveis fósseis. O desenvolvimento deste trabalho conjunto permitiu reunir competência e conhecimentos nesta área que foram a base para a fundação, em 1980, da SPES. Ao longo desta década foram desenvolvidos diversos trabalhos neste domínio, realçando-se o papel de destaque do INETI, através do seu Departamento de Energias Renováveis criado a partir do LEM.

Assim, assistiu-se à construção da Casa Termicamente Optimizada, no Porto, ao arranque da Central Solar de Águas de Moura, à criação de Comissões Técnicas de Normalização, produzindo as primeiras normas portuguesas na área dos equipamentos solares térmicos, ao desenvolvimento da óptica CPC aplicada à construção de colectores solares térmicos, para além da participação em projectos europeus nas áreas do potencial de radiação solar e dos testes de qualificação de colectores solares.

Na década de 90 assiste-se à acreditação do LECS - Laboratório de Ensaio de Colectores Solares, estrutura ligada ao INETI/DER e que se encontra na base da realização de ensaios de avaliação e qualificação de colectores e de sistemas solares térmicos. Nesta década são ainda desenvolvidos projectos a nível europeu e internacional em diversos domínios da

energia solar, como sejam a dessalinização, a secagem solar, a alta concentração, a térmica de edifícios, fornos solares, solar fotovoltaico, o arrefecimento solar, entre outros.

Ao nível dos incentivos à adopção deste tipo de tecnologias, destaca-se o aparecimento do Programa VALOREN e, mais tarde, do Programa ENERGIA, visando o financiamento de equipamento para o aproveitamento das energias renováveis e, em particular, da energia solar.

Na viragem para o séc. XXI, assiste-se à realização do FORUM ENERGIAS RENOVÁVEIS, organizado em 2001 pelo INETI e que contou com a colaboração das mais destacadas figuras nacionais na área da energia solar. Como resultado da discussão promovida naquele FORUM em torno da situação presente e das estratégias a seguir para uma maior penetração deste tipo de tecnologias na sociedade, surge em 2001 o Programa E4 - Eficiência Energética e Energias Endógenas e os sub-Programas deles decorrentes, Água Quente Solar para Portugal e P3E – Programa Nacional para a Eficiência Energética nos Edifícios, actualmente considerados na RCM 63/2003.

Como resultado destas iniciativas, assiste-se desde há algum tempo a um esforço conjunto no sentido de criar mecanismos de regulação e incentivos à utilização da energia solar nas suas diferentes vertentes, térmica, fotovoltaica e passiva, com a publicação de novos regulamentos mais rígidos que os anteriores, para a eficiência energética e características térmicas de edifícios, com a implementação de esquemas de certificação de equipamentos e de esquemas de formação de projectistas e instaladores, bem como com a regulamentação da venda de electricidade solar fotovoltaica por pequenos produtores independentes.

1.3 Mercado solar térmico em Portugal

Observa-se facilmente através da Figura 2 que Portugal possui excelentes condições para o aproveitamento da radiação solar, sendo dos países que recebe mais energia por m² em toda a Europa. No entanto, apesar das boas condições, Portugal permanece na cauda da Europa no que respeita ao aproveitamento da energia solar, nomeadamente no que se refere ao aquecimento de água.

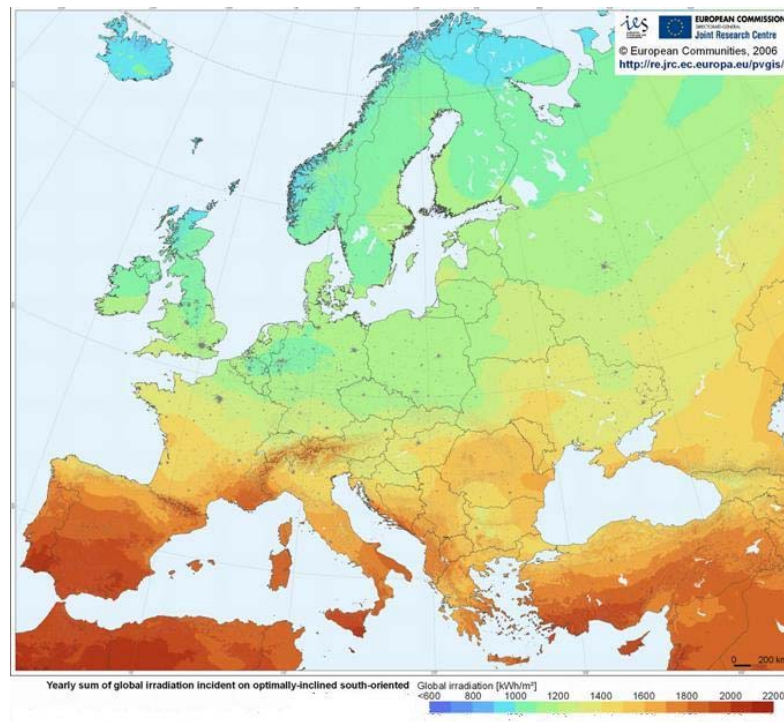


Figura 2: Mapa de quantidade de irradiação solar [kWh/m²] na Europa [22]

Este facto deve-se essencialmente aos seguintes factores [21]:

- algumas más experiências no primeiro período de expansão do solar na década de 80, associadas à falta de qualidade dos equipamentos e, sobretudo, das instalações, o que afectou negativamente a sua imagem;
- falta de informação específica sobre as razões do interesse e as possibilidades desta tecnologia junto dos utilizadores;
- custo elevado do investimento inicial, desencorajando a adopção de uma solução que, afinal, pode competir com as soluções convencionais;
- barreiras técnicas e tecnológicas à inovação ao nível da indústria da construção e da instalação de equipamentos térmicos;
- insuficiência e inadequação das medidas de incentivo.

A área instalada de painéis solares térmicos em Portugal tem vindo a crescer nos últimos anos devido à crescente exposição mediática do solar térmico, e à imposição legal publicada no RCCTE de obrigatoriedade de instalação de colectores solares térmicos para produção de AQS em edifícios residenciais novos. O recurso a colectores solares para aquecimento de água tornou-se uma prioridade da política energética nacional, pelo que representa de potencial de aumento de utilização de recursos renováveis próprios, de redução das emissões de CO₂, de sustentabilidade energética nos edifícios e de redução da dependência externa.

A Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, concluiu, que para além das energias renováveis, que podem ser usadas pela via eléctrica, abrem-se também novas oportunidades significativas para usos directos da energia solar, nomeadamente no que diz

respeito à produção de água quente sanitária e industrial, dando sequência ao Projecto Água Quente Solar para Portugal com a implementação a cargo da DGE. Desta forma, o Programa Água Quente Solar para Portugal é redinamizado, tirando partido, nomeadamente, da nova legislação sobre essa matéria no âmbito da revisão do RCCTE.

A medida Solar Térmico é compatível com o previsto no Plano Nacional de Alterações Climáticas (PNAC), prevendo inclusive uma antecipação das respectivas metas. Com as metas definidas no Plano “Portugal Eficiência 2015” para 2015, prevê-se a instalação de 1.385.665 m² (o valor médio para os 14 anos previstos na medida PNAC é aproximadamente de 100.000 m²/ano). A medida consiste na dinamização do solar térmico em Portugal com a criação de um incentivo financeiro que reduza o custo dos sistemas solares térmicos, que permita ultrapassar a barreira do elevado investimento inicial na sua aquisição.

O objectivo a alcançar com a medida Micro-produção térmica visa a criação de um mercado sustentado de 175.000 m² de colectores instalados por ano, o que conduzirá a um número da ordem de 1,4 milhões de m² de colectores instalados, e operacionais, até 2015, o que representará cerca de 1 em cada 15 edifícios com Solar Térmico. Este programa visa também revitalizar o parque de equipamentos existentes, criando condições favoráveis para a substituição e/ou reparação/manutenção especializada.

Relativamente ao impacto, estima-se que através da implementação da área indicada de solar térmico possam ser alcançadas economias de 58.796 tep em 2015, nos sectores residencial e serviços.

1.4 RCCTE

O Decreto-Lei n.º 80/2006 denominado RCCTE, estabelece requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente ao nível das características da envolvente (paredes, envidraçados, pavimentos e coberturas), limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos para reduzir as necessidades energéticas cujos valores são impostos. Por outro lado, num claro incentivo à utilização de sistemas eficientes e de fontes energéticas com menor impacte em termos de consumo de energia primária. A nova legislação determina também a obrigatoriedade da instalação de colectores solares e valoriza a utilização de outras fontes de energia renováveis para a determinação do desempenho energético do edifício.

1.4.1 Consumos Energéticos dos Edifícios

O RCCTE impõe limites aos consumos energéticos dos edifícios sujeitos à aplicação do Decreto-Lei. É obrigatório que os valores das necessidades anuais nominais específicas de energia útil para aquecimento (N_{ic}), arrefecimento (N_{vc}), produção de AQS (N_{ac}) e de energia

primária (N_{ic}), sejam todos inferiores ou, quando muito, iguais aos respectivos valores limite N_i , N_v , N_a , e N_t .

Para simplicidade de cálculo, considera-se todo o edifício (ou fracção autónoma) como sendo uma única zona, toda ela mantida à mesma temperatura de referência. O valor de N_{ic} e N_{vc} corresponde à energia útil que é necessário fornecer, ou retirar, à habitação para manter permanentemente no seu interior a temperatura de 20°C para a estação convencional de aquecimento e não exceder os 25°C para a estação convencional de arrefecimento, respectivamente. Esses valores não representam necessariamente o consumo real dessa zona do edifício e por esta razão podem ocorrer diferenças substanciais (por excesso ou por defeito) entre as condições reais de funcionamento e as condições nominais. O procedimento de cálculo normalizado do valor de N_{ic} e N_{vc} é, portanto, um método objectivo de comparação do comportamento térmico dos edifícios na fase de licenciamento.

O valor limite N_i depende dos valores do factor de forma da fracção autónoma (FA) correspondente e dos graus-dias do clima local, por outro lado o valor limite N_v depende da zona climática do local.

1.4.2 Divisão Climática

No âmbito do RCCTE, Portugal é dividido em três zonas climáticas de Inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de Verão (V1, V2 e V3).

Os limites das zonas climáticas de Inverno foram estabelecidos a partir do número de graus-dias de aquecimento (GD20) na base de 20°C. Os limites das zonas climáticas de Verão foram estabelecidos com base nos valores actualizados da temperatura exterior de projecto de Verão, à qual corresponde a temperatura de bolso seco do ar exterior que não é excedida, em média, durante mais do que 2,5% do período correspondente à estação convencional de arrefecimento (1 de Junho a 30 de Setembro).

O zonamento climático (Figura 3 e Figura 4) é discriminado por Concelhos (Portugal Continental). Para ter em conta a influência, quer da altitude a que se situa uma dada localidade quer da sua proximidade à costa litoral, devem ser feitos eventuais ajustes em relação ao zonamento climático de Inverno e de Verão, e aos correspondentes valores de referência.

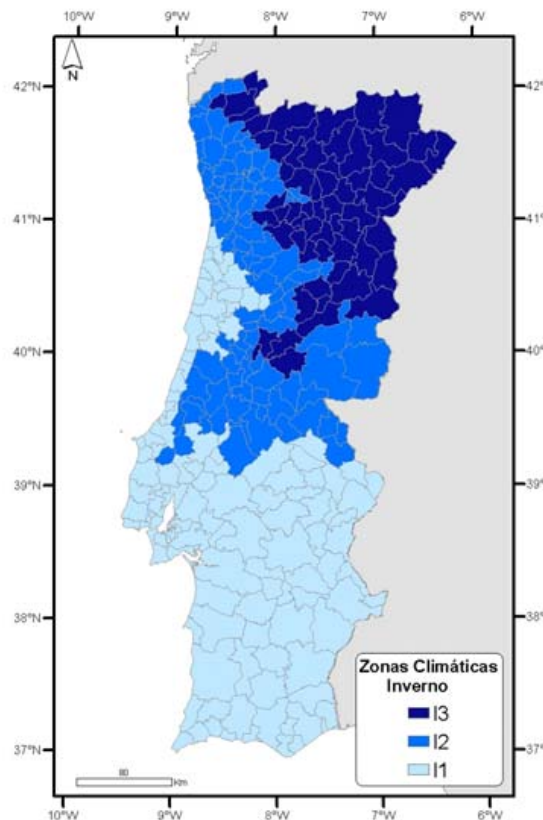


Figura 4: Zonas climáticas de Inverno em Portugal continental

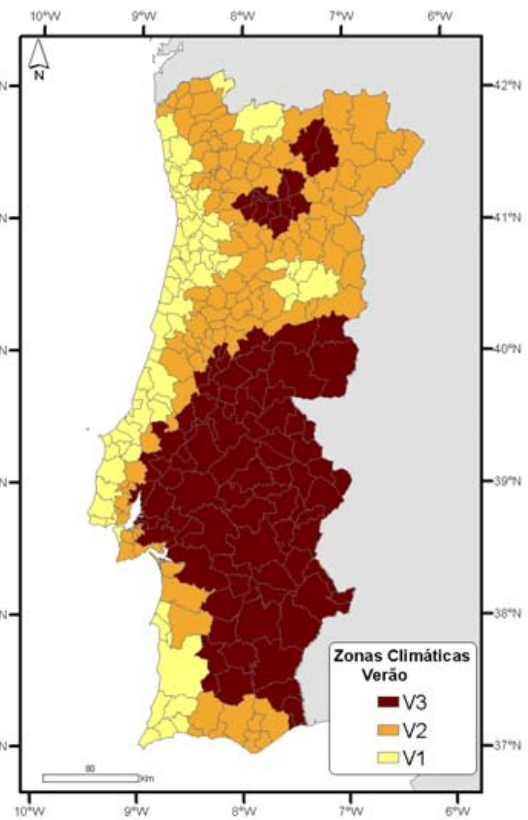


Figura 3: Zonas climáticas de Verão em Portugal continental

1.4.3 Água quente sanitária (AQS)

O RCCTE torna obrigatório o recurso a sistemas de colectores solares térmicos para aquecimento de água sanitária nos novos edifícios e em grandes reabilitações, na base de 1 m² de colector por ocupante previsto sempre que os edifícios tenham uma exposição solar adequada, podendo este valor ser reduzido de modo a que não seja ultrapassada 50% da área de cobertura total disponível, em terraço ou nas vertentes orientadas no quadrante sul, entre sudeste e sudoeste. Entende-se por exposição solar adequada a existência de cobertura em terraço ou uma cobertura inclinada com água cuja normal esteja orientada numa gama de azimutes de 90° entre Sudeste e Sudoeste. As coberturas não deverão ainda ser sombreadas por obstáculos significativos no período que se inicia diariamente duas horas antes do nascer do Sol e termina duas horas antes do ocaso. Na prática, não pode haver obstruções com altura superior a 20°. O efeito das obstruções é basicamente impedir a chegada aos colectores de radiação directa e de radiação difusa da zona circumsolar, e é mais crítico entre sudeste e sudoeste, gama onde deve ser assegurada a melhor exposição possível. Na Figura 5 apresenta-se uma representação gráfica do descrito.

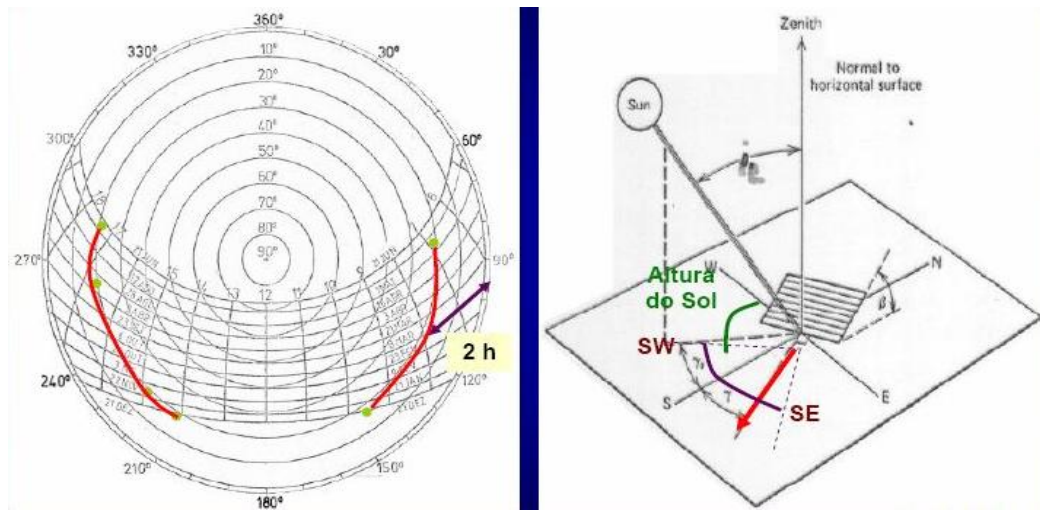


Figura 5: “Exposição solar adequada” definida no RCCTE

A experiência resultante da aplicação prática da regra de 1 m² de colector por ocupante no âmbito do SCE, revelou a necessidade de se adoptarem critérios de aceitação de soluções alternativas que demonstrem estar em linha com os objectivos de eficiência energética e qualidade associados à nova regulamentação, e que beneficiem as melhores tecnologias. Esta constatação foi suportada por alguns dos principais agentes do sector, que manifestaram a sua preocupação e interesse na resolução daquilo que consideram potenciais constrangimentos a uma aplicação eficaz desta tecnologia.

Neste sentido foi definida pela ADENE, uma metodologia para aceitação de soluções que não cumpram estritamente a regra de 1 m² de colector por ocupante, isto sem colocar em causa a elegibilidade de qualquer solução que cumpra com a referida regra. A solução alternativa deve captar, numa base anual, a energia equivalente a um sistema solar térmico idêntico mas que utilize colector(es) padrão, definido(s) de seguida:

- rendimento óptico = 69%
- coeficiente de perdas térmicas $a_1 = 7,500 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $a_2 = 0,014 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}^2)$
- modificador de ângulo para incidência de $50^\circ = 0,87$

O RCCTE prevê, ainda, a utilização de qualquer outra forma de energia renovável, por exemplo, painéis fotovoltaicos, energia eólica, energia geotérmica, recuperação de calor de equipamentos ou fluidos residuais, etc, em alternativa à utilização de colectores solares térmicos, que numa base anual, captem energia equivalente à dos colectores solares. Quanto ao fim a que se destina a energia renovável, esta poderá não ser para o aquecimento de água desde que seja mais eficiente, ou conveniente, incluindo energia exportada para o exterior.

Nos casos de sistemas centralizados de preparação de AQS, comuns a várias fracções autónomas de um mesmo edifício, (ou o recurso a redes urbanas de aquecimento), o projectista deverá calcular e demonstrar a eficiência energética caso a caso, sendo aplicáveis, nos ramais principais de distribuição de AQS exteriores às fracções autónomas, os requisitos de isolamento térmico especificados no Anexo III do RSECE.

1.4.4 Método de cálculo do N_{ac} e do N_a

O método de cálculo de N_{ac} consiste na aplicação da seguinte expressão:

$$N_{ac} = \frac{(\frac{Q_a}{\eta_a} - E_{solar} - E_{ren})}{A_p} [kWh/m^2.ano] \quad (1)$$

O termo η_a representa a eficiência de conversão do sistema de preparação de AQS nomeadamente a “média sazonal”, não a correspondente ao funcionamento do equipamento em regime permanente a plena potência. Em termos convencionais, isto traduz-se pela avaliação da eficiência nominal a 30% da carga parcial, devendo ser este o valor adoptado.

O termo E_{solar} [kWh/ano] representa a contribuição energética anual do sistema solar térmico para as necessidades de energia útil para preparação de AQS da FA e é calculado obrigatoriamente através do programa informático Solterm do INETI.

O termo E_{ren} [kWh/ano] representa a contribuição energética anual de quaisquer outras formas de energia renovável, que seja captada no edifício para a produção de água quente sanitária, e é calculada através de método justificado e reconhecido.

O termo Q_a [kWh/ano] representa a energia útil despendida anualmente com sistemas convencionais utilizados na preparação da AQS. É calculado da seguinte forma:

$$Q_a = \frac{M_{AQS} \cdot 4187 \cdot \Delta T \cdot n_d}{3600000} [kWh/ano] \quad (2)$$

O termo ΔT é o aumento de temperatura necessário à preparação da AQS, e toma o valor de referência de 45°C. Este valor considera que a água da rede pública de abastecimento é disponibilizada a uma temperatura média anual de 15°C e que deve ser aquecida à temperatura de 60°C.

O termo n_d refere-se ao número anual de dias de consumo de AQS, e depende do período convencional de utilização dos edifícios.

O termo M_{AQS} [litros] é o consumo médio diário de referência de AQS a 60°C, e em edifícios residenciais é dado pela expressão:

$$M_{AQS} = 40 \text{ l} \times \text{número de ocupantes} \quad (3)$$

sendo o número convencional de ocupantes de cada fracção autónoma definido na tabela seguinte:

Tabela 1: Número convencional de ocupantes em função da tipologia da FA

Tipologia	T0	T1	T2	T3	...	Tn
Número de ocupantes	2	2	3	4	...	n + 1

O limite máximo fixado para N_{ac} denomina-se N_a , e corresponde à utilização de um sistema bastante ineficiente, com um rendimento anual de 65%. N_a , nos termos do RCCTE, é definido pela equação 3.

$$N_a = \frac{0,081 \cdot M_{AQS} \cdot n_d}{A_p} [kWh/m^2 \cdot ano] \quad (4)$$

1.4.5 Método de cálculo do N_{tc} e do N_t

O método de cálculo de N_{tc} consiste na aplicação da seguinte expressão:

$$N_{tc} = 0,1 \cdot \left(\frac{N_{ic}}{\eta_i} \right) \cdot F_{pui} + 0,1 \cdot \left(\frac{N_{vc}}{\eta_v} \right) \cdot F_{puv} + N_{ac} \cdot F_{pua} [kgep/m^2 \cdot ano] \quad (5)$$

em que F_{pui} e F_{puv} são factores de conversão de energia útil para energia primária, em função das energias utilizadas em cada edifício para aquecimento e arrefecimento ambiente, respectivamente. Os factores de conversão F_{pu} entre energia útil e energia primária são definidos periodicamente por despacho do Director Geral de Geologia e Energia, em função do mix energético nacional na produção de electricidade – distribuição percentual das fontes de energia primária na produção de energia eléctrica da rede nacional, variável anualmente em função da hidraulicidade. Actualmente utilizam-se os factores a seguir indicados:

- a) Electricidade:
 $F_{pu} = 0,290 \text{ kgep/kWh}$
- b) Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos:
 $F_{pu} = 0,086 \text{ kgep/kWh}$

Na Figura 6 observa-se um exemplo de conversão de energia primária para energia útil, neste caso para consumo de electricidade.

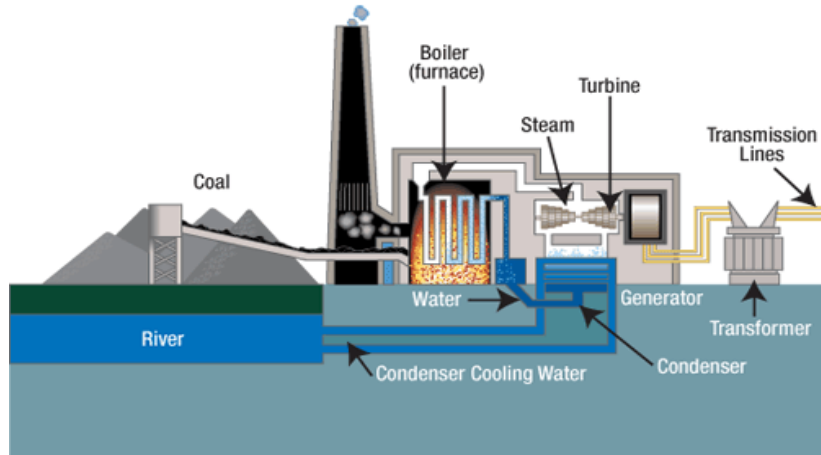


Figura 6: Exemplo de conversão entre energia primária e energia útil [23]

A eficiência nominal dos equipamentos para aquecimento e arrefecimento é traduzida, respectivamente, por η_i e η_v .

O valor limite para N_{tc} denomina-se N_t , e é definido pela seguinte expressão:

$$N_t = 0,9 \cdot (0,01 \cdot N_i + 0,01 \cdot N_v + 0,15 N_a) [kgep/m^2 \cdot ano] \quad (6)$$

Os factores de ponderação incluídos nesta equação pretendem traduzir os padrões típicos de consumo nas habitações, obtidos em levantamentos estatísticos [5]: 50% dos consumos para AQS, 25% para aquecimento e arrefecimento ambiente, e 25% para outros fins específicos. Na prática, a equação 5 traduz o princípio de que as habitações não são nem aquecidas nem arrefecidas 24 horas por dia, durante a estação de aquecimento e arrefecimento, respectivamente. Desta forma, considera-se que os edifícios apenas são climatizados, em média, 10% do tempo, com a consequente e idêntica redução nas necessidades de energia para aquecimento e para arrefecimento. O factor 0,9 pretende traduzir o princípio de que um edifício que cumpra estritamente o mínimo exigido pelo RCCTE em termos de qualidade térmica da envolvente e dos respectivos sistemas de aquecimento, de arrefecimento e de preparação de AQS, não será regulamentar. Para o ser, terá que ser 10% melhor do que a soma ponderada dos requisitos mínimos de qualidade (N_i , N_v e N_a).

No cálculo das necessidades de energia primária, para contabilizar a contribuição energética de um sistema solar térmico para o aquecimento e/ou para arrefecimento do edifício, insere-se uma nova parcela afectada de um F_{pu} nulo, correspondente à fracção energética fornecida pelo solar térmico.

1.4.6 Requisitos mínimos de qualidade térmica para a envolvente dos edifícios

O RCCTE impõe requisitos mínimos de qualidade térmica para a envolvente dos edifícios. Nenhum elemento da envolvente de qualquer edifício pode ter um coeficiente de transmissão térmica em zona corrente (U) superior ao valor correspondente na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos [U - W/m².°C]

Elementos da envolvente	Zona climática		
	I1	I2	I3
Elementos exteriores			
Zonas opacas verticais	1,8	1,60	1,45
Zonas opacas horizontais	1,25	1	0,90
Elementos interiores			
Zonas opacas verticais	2	2	1,90
Zonas opacas horizontais	1,65	1,30	1,20

É também imposto que nenhuma zona de qualquer elemento opaco da envolvente, incluindo zonas de ponte térmica plana, nomeadamente pilares, vigas, caixas de estore, pode ter um valor de U, calculado de forma unidimensional na direcção normal à envolvente, superior ao dobro do dos elementos homólogos (verticais ou horizontais) em zona corrente, respeitando sempre, no entanto, os valores máximos indicados na Tabela 2.

Outra obrigatoriedade existente é que nenhum vão envidraçado da envolvente de qualquer edifício com área total superior a 5% da área útil de pavimento do espaço que serve, desde que não orientado a norte (entre noroeste e nordeste), pode apresentar um factor solar correspondente ao vão envidraçado com o(s) respectivo(s) dispositivo(s) de protecção 100% activo(s) que exceda os valores indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Factores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem

Classe de inércia térmica, factor solar:	Zona climática		
	V1	V2	V3
Fraca	0,15	0,15	0,10
Média	0,56	0,56	0,50
Forte	0,56	0,56	0,50

1.4.7 Classificação Energética

A classe de eficiência energética de um edifício segue uma escala pré-definida de 7 + 2 classes (A^+ , A, B, B^- , C, D, E, F e G), em que a classe A^+ corresponde a um edifício com melhor desempenho energético, e a classe G corresponde a um edifício de pior desempenho energético. Nos edifícios novos, as classes energéticas variam apenas entre A^+ e B^- . Os edifícios existentes podem ter qualquer classe.

Num edifício sujeito à aplicação do RCCTE, a etiqueta energética é calculada através da seguinte expressão:

$$N = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (7)$$

As classes energéticas são atribuídas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4: Escala utilizada na classificação energética dos edifícios sujeitos ao RCCTE

Classe energética	N
A^+	$N \leq 0,25$
A	$0,25 < N \leq 0,50$
B	$0,50 < N \leq 0,75$
B^-	$0,75 < N \leq 1$
C	$1 < N \leq 1,50$
D	$1,50 < N \leq 2,00$
E	$2,00 < N \leq 2,50$
F	$2,50 < N \leq 3,00$
G	$3,00 < N$

2 FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DA ENERGIA SOLAR

2.1 Constante solar, ângulo solar, espectro solar e radiação solar

A energia solar aproxima-se da Terra na forma de radiação electromagnética, com comprimentos de onda desde 0,1 μm (raios-x) até 100 m (ondas de rádio). A Terra mantém um equilíbrio térmico entre a captação anual de radiação solar com comprimentos de onda curtos (0,3 até 2,0 μm) e o fluxo de saída de radiação com comprimentos de onda longos (3,0 até 30 μm). Somente um pequeno intervalo é considerado em aplicações terrestres, porque 99% da energia solar possui comprimentos de onda entre 0,28 e 4,96 μm . O valor actual da constante solar (que é definido como a intensidade de radiação solar numa superfície normal aos raios solares, logo a seguir à atmosfera terrestre) é de 1367 W/m².

O eixo de rotação em torno do qual a Terra gira é inclinado a um ângulo de 23,45° em relação à normal ao plano da órbita. O eixo inclinado da Terra resulta numa variação diária do ângulo entre a linha Sol-Terra e o plano equatorial da Terra, denominado declinação solar δ . Este ângulo varia com a data, de acordo com a seguinte equação:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360^\circ \cdot \frac{284+N}{365} \right) \quad (8)$$

onde N = dia do ano, sendo o dia 1 de Janeiro correspondente ao dia 1.

Para além da atmosfera terrestre, a temperatura de corpo negro efectiva do sol é de 5760 K. A máxima intensidade espectral ocorre a 0,48 μm na porção verde do espectro visível. A porção ultra-violeta do espectro abaixo de 0,40 μm contém 8,73% do total, outros 38,15% são contidos na região visível entre 0,40 e 0,70 μm , e a região de infravermelhos contém os restantes 53,12%. Na Figura 7 é representado o espectro da radiação solar que chega à superfície terrestre.

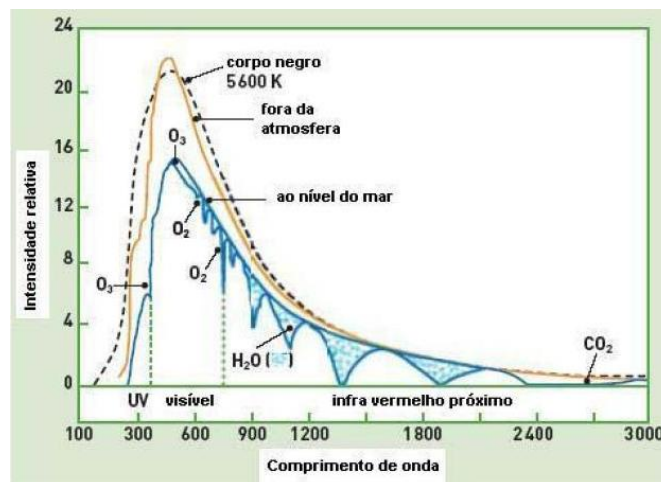


Figura 7: Espectro da radiação solar que chega à superfície da Terra (ao nível do mar) [6]

Ao passar através da atmosfera terrestre, uma parte da radiação directa do sol é reflectida pelos componentes atmosféricos (as nuvens), outra parte é absorvida (O_3 , O_2 , H_2O ,...) e a restante é difundida (moléculas, gotas de água, pó em suspensão). Existe ainda a radiação reflectida, proveniente da reflexão no chão e em objectos circundantes. A reflectividade do chão designa-se por albedo e depende apenas da composição e cor do chão (existência de neve, água, vegetação, etc.). A Figura 8 representa os componentes da radiação solar.

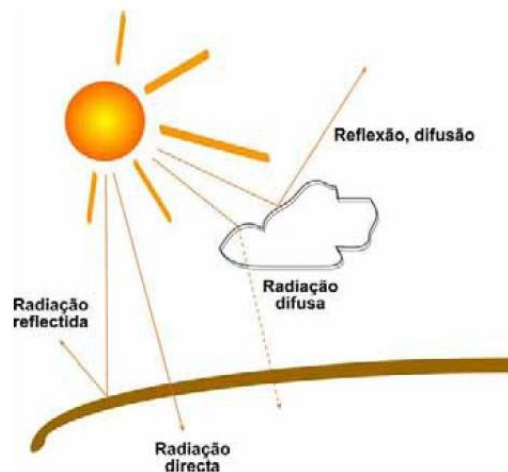


Figura 8: Componentes da radiação solar [7]

A quantidade máxima diária de irradiação solar que pode ser disponibilizada numa determinada localização é aquela que cai num colector plano com a sua superfície colocada perpendicularmente aos raios solares, de forma a receber radiação directa e difusa. Em colectores planos fixos, a quantidade total de irradiação num dia limpo depende da orientação e inclinação. Se considerarmos uma latitude de 40° N, a irradiação total em superfícies horizontais atinge o seu máximo no meio do Verão, e as superfícies verticais orientadas a sul experimentam a sua irradiação máxima durante o Inverno.

Geralmente, os colectores planos são montados num ângulo fixo [9] (acima da horizontal) de modo a disponibilizar a quantidade óptima de irradiação para cada aplicação. Os colectores aplicados em sistemas de aquecimento a funcionar no Inverno beneficiam de ângulos de inclinação mais altos do que aqueles utilizados para funcionar com sistemas de arrefecimento no Verão. A água quente sanitária solar, que deve funcionar satisfatoriamente durante o ano inteiro, requer um ângulo que é basicamente um compromisso entre os valores óptimos de Verão e de Inverno.

Na Figura 9 observa-se os vários ângulos solares com respeito a uma superfície inclinada.

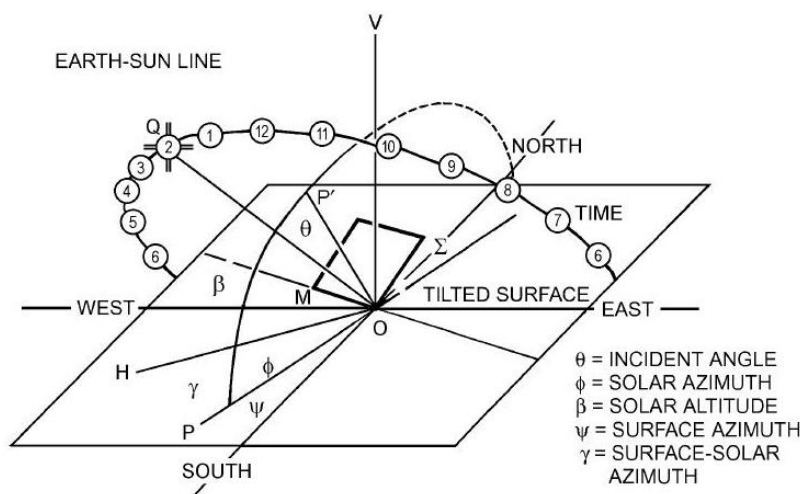


Figura 9: Ângulos solares relativamente a uma superfície inclinada [9]

O ângulo entre a linha normal à superfície irradiada (OP' na Figura 9) e a linha sol-terra OQ é denominado o ângulo de incidência θ . É uma variável importante em tecnologia solar porque afecta a intensidade da componente directa de radiação solar que incide na superfície, e a capacidade da mesma em absorver, transmitir, ou reflectir os raios solares.

2.2 Aproveitamento da energia solar

A energia solar pode ser convertida em processos químicos, eléctricos ou térmicos. A fotossíntese é um processo químico que produz alimentos e converte CO_2 em O_2 . As células fotovoltaicas convertem a energia solar em electricidade. No processo de conversão térmica, é fornecida energia térmica para aquecimento e arrefecimento ambiente, água quente sanitária, produção de electricidade, destilação, processos de calor industrial, etc.

2.2.1 Colectores planos

Um colector plano é geralmente constituído pelos seguintes elementos:

- Cobertura transparente – uma ou mais camadas de vidro ou outro material transparente à radiação. Assegura o efeito de estufa no interior do colector.
- Serpentina de tubos – para conduzir ou dirigir o fluido de transferência térmica da entrada para a saída.
- Placa absorvora – placa metálica absorvora, sobre a qual estão soldados os tubos.
- Colector de distribuição – admite e descarrega o fluido de transferência térmica.
- Isolamento – minimiza as perdas térmicas através da parte posterior e partes laterais do colector.

- Caixa – envolve todos os componentes protegendo-os contra o vento, poeira, chuva, etc.

Na Figura 10 é representada a secção através de um colector plano.

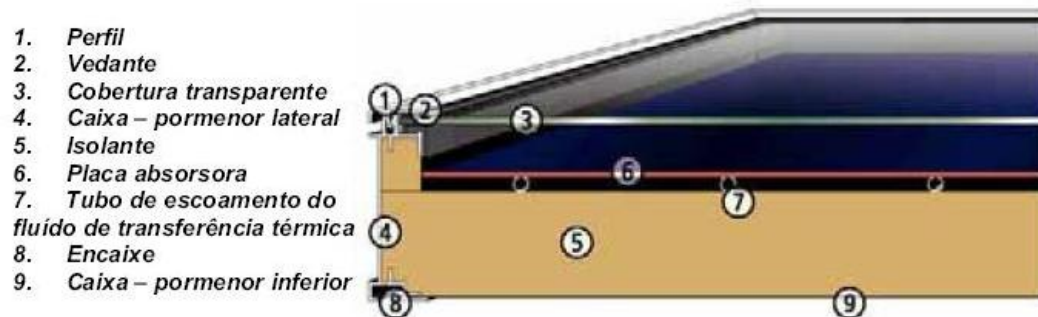


Figura 10: Secção através de um colector plano [7]

2.2.2 Cobertura selectiva

O colector solar ideal absorve o máximo de radiação solar possível através da cobertura, e perde o mínimo de calor possível para a atmosfera, transferindo o calor retido para o fluido de transporte. A absorptância da superfície colectora para radiação solar de comprimento de onda curto depende da natureza e cor da cobertura, e do ângulo de incidência.

Através de tratamentos químicos e electrolíticos, podem ser produzidas superfícies selectivas com valores elevados de absorptância de radiação solar α e valores baixos de emitância e . Essencialmente, superfícies selectivas típicas consistem numa camada superior fina, que é altamente absorvente à radiação solar com comprimento de onda curto mas relativamente transparente à radiação térmica com comprimento de onda longo, depositada num substrato que possui uma alta reflectividade e uma baixa emitância para radiação com comprimento de onda longo. As superfícies selectivas são particularmente importantes quando a temperatura da superfície do colector é muito mais alta que a temperatura do ar ambiente.

2.2.3 Colectores Concentradores

Temperaturas bastante superiores às aquelas conseguidas pelos colectores planos podem ser atingidas se uma grande quantidade de radiação solar for concentrada numa área colectora relativamente pequena.

É possível concentrar sem formar imagem com os chamados colectores parabólicos compostos (CPC). A concentração é mais baixa e estes colectores são normalmente estacionários (semelhantes aos colectores planos). No caso dos CPC's, a área absorvora é constituída por duas alhetas unidas a um tubo e colocadas em cima de uma superfície

reflectora. Como consequência, a captação solar realiza-se nas duas faces das alhetas e as perdas térmicas são inferiores. Na Figura 11 vemos o efeito dos raios solares sobre a superfície.

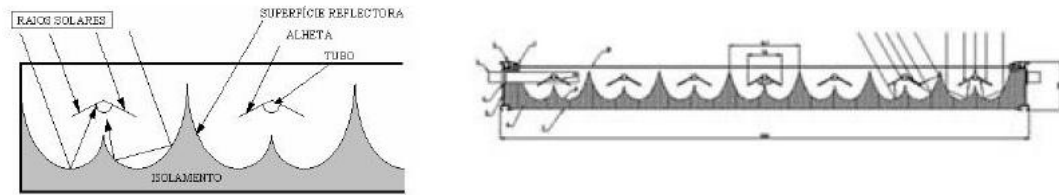


Figura 11: Efeito dos raios solares sobre a superfície dum coletor CPC [6]

O sol incide na parte superior das alhetas e na superfície parabólica reflectora. Os raios são reflectidos e acabam por incidir na parte inferior das alhetas ou directamente no tubo, contribuindo para aquecer ainda mais o fluido térmico. As perdas de calor são inferiores porque a área de absorção é inferior, por ser constituída só pela superfície das alhetas. A diminuição das perdas implica uma melhoria do rendimento térmico. Por outro lado, a inércia térmica do coletor é inferior e a temperatura nominal de funcionamento é atingida mais rapidamente. A zona situada entre a superfície reflectora e a caixa é preenchida com isolamento, para minimizar as perdas de calor.

2.2.4 Colectores de tubos de vácuo

Para reduzir as perdas térmicas num coletor, tubos de vidro (com absorsores internos) são sujeitos a vácuo. Por forma a eliminar as perdas de calor por convecção, a pressão dentro dos tubos de vidro deve ser pelo menos de 10^{-2} bar [7]. Um aumento adicional de evacuação reduz as perdas por condução térmica. Assim, as perdas de calor para a atmosfera são significativamente reduzidas, sendo de realçar que mesmo com uma temperatura de absorção de 120°C ou maior, os tubos de vidro permanecem frios no seu exterior. A maioria dos tubos de vácuo é evacuada abaixo dos 10^{-5} bar. No que diz respeito a perdas por radiação, uma vez que as características de perda do coletor não dependem do meio em que este se encontra, não podem ser reduzidas pela criação de vácuo. Estas perdas de radiação mantêm-se reduzidas, como no caso de colectores planos, pela selecção de bons revestimentos (valor de ϵ baixo).

Na circulação “tubo de calor” (heat pipe), um revestimento selectivo de metal com propriedades de condutor térmico, ligado a um tubo de aquecimento, é colocado dentro do tubo de vácuo. O tubo de aquecimento é preenchido com álcool ou com água em vácuo, que é evaporado para temperaturas a partir dos 25°C. O vapor que é criado sobe, transferindo calor por condensação através do permutador de calor para o fluido de transferência térmica. O fluido condensado arrefece e volta a descer para ser aquecido novamente. Na Figura 12 é representada a secção transversal deste tipo de coletor de tubos de vácuo.

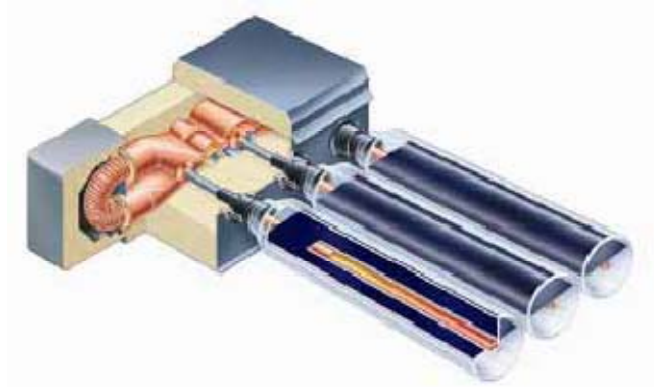


Figura 12: Secção transversal de um colector de tubos de vácuo com circulação em "heat pipe" [7]

2.2.5 Desempenho do colector

Em regime estacionário, o calor útil fornecido por um colector solar é igual à energia absorvida no fluido de transferência térmica reduzido das perdas de calor directas e indirectas entre a superfície e a vizinhança. Este princípio é definido através da seguinte relação:

$$q_u = I_{t\theta} \cdot (\tau\alpha)_\theta - U_L \cdot (t_p - t_{amb}) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{fe} - t_{fi}) / A_{ap} \quad (9)$$

em que t_p refere-se à temperatura da placa absorvedora, t_{amb} à temperatura ambiente, e t_{fe} e t_{fi} às temperaturas de saída e entrada no colector. A expressão geral que define a eficiência do colector é:

$$\eta = (\tau\alpha)_\theta - U_L(t_p - t_{amb}) / I_{t\theta} \quad (10)$$

Para ângulos de incidência inferiores a 35°, o produto $\tau\alpha$ é essencialmente constante e a equação 10 é linear com respeito ao parâmetro $(t_p - t_{amb}) / I_{t\theta}$, desde que U_L permaneça constante.

A ASHRAE (1977) sugeriu que um termo adicional, o factor de remoção de calor do colector F_R , seja incluído de forma a permitir a utilização da temperatura de entrada do fluido nas equações 9 e 10. As equações resultantes são:

$$q_u = F_R \cdot [I_{t\theta}(\tau\alpha)_\theta - U_L(t_{fi} - t_{amb})] \quad (11)$$

$$\eta = F_R \cdot (\tau\alpha)_\theta - F_R \cdot U_L(t_{fi} - t_{amb}) / I_{t\theta} \quad (12)$$

onde F_R é considerado o rácio entre o calor realmente fornecido pelo colector e aquele que seria entregue caso o absorvedor estivesse a uma temperatura uniforme igual à de entrada do fluido (t_{fi}).

De forma a comparar características entre colectores solares térmicos, de acordo com as normas EN12975 e EN12976, na equação 12, a parcela $F_R \cdot (\tau\alpha)_\theta$ é substituída por η_o (rendimento óptico), e $F_R \cdot U_L$ é substituído por a_1 ($W/m^2.K$). É também adicionada uma nova parcela denominada a_2 ($W/m^2.K^2$), visto que normalmente as perdas térmicas não aumentam linearmente com a diferença de temperatura, mas aumentam mais (através de uma potência quadrática) com o aumento da radiação térmica.

Quando o ângulo de incidência ultrapassa os 30° , $\tau\alpha$ começa a diminuir, e consequentemente, o calor absorvido também decresce. As perdas no colector são geralmente maiores à medida que nos afastamos do meio-dia solar, e como tal a eficiência também desce. Então, a eficiência diurna é menor que o desempenho próximo do meio-dia. Durante o início da tarde, a eficiência é ligeiramente superior do que à hora comparável da manhã, visto que a temperatura do ar ambiente é mais baixa de manhã do que de tarde.

2.3 Componentes do Sistema

Neste capítulo serão descritos os componentes do sistema solar térmico que asseguram as funções de captar, armazenar, transportar, controlo, e distribuição de calor solar num sistema de AQS:

- Colectores planos – geralmente utilizados para aquecimento de água devido às cargas necessárias durante o ano, com temperaturas desde os 30° até os $80^\circ C$. Os colectores devem suportar condições meteorológicas adversas, assim como pressões elevadas.
- Fluido de transferência térmica – transporta calor dos colectores solares à água sanitária percorrendo todo o circuito primário. É uma mistura de água com um anti-congelante. Este entre outras funções, permite diminuir a temperatura de congelação da mistura, aumentar ligeiramente a de ebulição, e possui ainda características anti-corrosivas. A percentagem de anti-congelante na mistura é função da temperatura de congelação pretendida. Por exemplo, uma concentração volúmica de 25% é adequada à gama de temperaturas mínimas extremas nas zonas urbanas de Portugal. Saliente-se que ainda que a temperatura ambiente em determinados pontos do país não apresente valores negativos, as perdas por radiação podem levar o circuito primário a descer abaixo dos $0^\circ C$. Sob o ponto de vista energético, o principal efeito do anticongelante, com capacidade calorífica menor que a água, é aumentar um pouco a temperatura do circuito primário e assim promover as perdas térmicas, mas ligeiramente.
- Sistema de armazenamento de energia térmica – o calor captado é praticamente sempre armazenado como líquido em tanques com isolamento adequado. As

estimativas para dimensionamento dos depósitos geralmente vão desde os 40 aos 100 litros por m² de área colectora instalada. O volume de armazenamento deve ser analisado e dimensionado de acordo com as necessidades de água, e perfil de consumo.

- Permutadores de calor – os sistemas solares de aquecimento de água indirectos requerem um ou mais permutadores de calor. Estes influenciam a eficiência de captação de energia para AQS. A sua selecção depende das características do fluido que atravessa o permutador, e as suas próprias propriedades. As características do fluido a considerar são o tipo de fluido, calor específico, caudal mássico, e temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio. As propriedades físicas do permutador de calor a considerar são o coeficiente global de transferência de calor e a área de transferência do permutador.
- Vaso de expansão – um sistema solar térmico a operar em circuito fechado necessita de um vaso de expansão de forma a prevenir pressões excessivas. O fluido térmico nos colectores solares quando entra em estagnação pode evaporar causando pressões excessivas no circuito primário, sendo os vasos de expansão dimensionados para essa situação.
- Bomba circuladora – faz circular o líquido de transferência térmica através dos colectores solares e permutadores de calor. Em sistemas solares de aquecimento de água, a bomba é geralmente um circulador centrífugo alimentado por um motor. As bombas têm que fornecer pressão de forma a compensar o atrito ao longo do circuito.
- Tubagem – os materiais mais frequentemente utilizados são o aço inox, o cobre, o aço galvanizado, o aço negro e os materiais plásticos (p.e. PEX). A mais utilizada é o cobre soldado por brasagem forte. O cobre resiste à corrosão, tanto dos líquidos que circulam pelo seu interior como dos agentes exteriores, ar, humidade ou outros elementos que entrem em contacto com ele. A sua maleabilidade e ductilidade permitem uma cómoda manipulação e uma grande facilidade para realizar traçados complicados.
- Válvulas – são localizadas de forma a assegurar a eficiência do sistema, desempenho satisfatório, e a segurança do equipamento e pessoal.
- Equipamentos auxiliares de produção de calor – em dias de sol, um sistema típico de energia solar deve fornecer água a uma temperatura pré-definida, e o depósito de armazenamento deve ter o tamanho adequado de forma a acumular água suficiente para um dia ou dois. Devido à natureza imprevisível da radiação solar, um equipamento de apoio tem que ser instalado para responder às solicitações de água quente.
- Controlador do sistema – regula a captação de energia solar através do controlo da circulação do fluido, activa a protecção do sistema contra congelamento e sobreaquecimento, e inicia o aquecimento auxiliar quando necessário. Através da leitura de valores de temperatura, o controlador dá ordens de comando aos componentes (bombas, válvulas, etc.) do sistema, regulando o seu funcionamento.

2.4 Armazenamento de energia em sistemas solares

A energia fornecida pelo sol não pode ser controlada, e raramente coincide com a variação das necessidades de energia térmica. Desta forma é necessário armazenar o calor gerado para ser utilizado quando necessário. Idealmente deveria ser possível armazenar a energia térmica gerada durante o Verão para ser utilizada no Inverno (armazenamento sazonal).

A escolha do sistema de armazenamento depende da natureza do processo. Para aquecimento de água, segundo Duffie; Beckman (1991), a acumulação de energia na forma de calor sensível da água armazenada, é o mais lógico. A água aquecida gradualmente durante o dia é armazenada para utilização nos momentos de consumo, inclusive durante a noite. O volume acumulado deve ser determinado em função do perfil de consumo, do volume de consumo diário e da relação entre a temperatura de utilização e da temperatura de armazenamento da água.

2.4.1 Consumos

As cargas cobertas pelos sistemas de aquecimento de água podem ser consideradas como constituídas por três partes. Em primeiro lugar, as necessidades de calor sensível da água têm que ser satisfeitas. Se um caudal de água \dot{m} for aquecido desde uma temperatura de abastecimento T_1 até uma temperatura de entrega T_2 , a taxa necessária de adição de calor sensível será:

$$\dot{L}_W = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (13)$$

Em segundo lugar, as perdas térmicas dos sistemas de distribuição têm que ser compensadas. Estas podem ser estimadas através de métodos convencionais. Se for utilizada recirculação contínua (como em edifícios de grandes dimensões onde água quente “instantânea” é necessária em localizações afastadas do sistema de aquecimento da água), as perdas das condutas podem ser da mesma magnitude do que as necessidades de calor sensível [10].

Em terceiro lugar, as perdas térmicas dos depósitos de acumulação podem ser significativas. A taxa de perdas do tanque \dot{L}_t é estimada através da área (A) superficial do depósito, coeficiente (U) de perdas térmicas, e a diferença de temperaturas entre a água ($T_{\text{água}}$) no tanque e a temperatura ambiente (T_{amb}) nas redondezas do tanque:

$$\dot{L}_t = (UA) \cdot (T_{\text{água}} - T_{\text{amb}}) \quad (14)$$

A contribuição do sistema solar térmico para as necessidades totais de consumo designa-se por fracção solar, de acordo com a seguinte expressão:

$$f = \frac{\text{energia fornecida pelo sistema solar}}{\text{energia necessária ao consumo}} \quad (15)$$

2.5 Aquecimento de água

Em sistemas solares de aquecimento de água, a água para consumo é aquecida directamente no colector ou indirectamente por um fluido térmico que é aquecido no colector, passa através dum permutador de calor, e transfere o seu calor à água de consumo. O fluido térmico é transportado por circulação natural (termossifão) ou forçada, em que nesta última há utilização de bombas circuladoras ou ventoinhas. Excepto para os sistemas em termossifão, que são auto-regulados, os restantes são controlados por termostatos diferenciais. A escolha do sistema dependerá da carga energética a cobrir e da possibilidade de colocar o depósito acumulador acima da bateria de colectores.

2.5.1 Sistemas com circulação natural

A movimentação do fluido térmico em sistemas com circulação natural faz-se por convecção natural, ocorrendo quando o colector solar aquece suficientemente de forma a estabelecer uma diferença de densidades no fluido que percorre o colector, o tanque, e a linha de alimentação entre o tanque e o colector. A diferença de densidades é função da diferença de temperaturas, e o caudal é então função do ganho útil do colector que produz esse diferencial. Nestas circunstâncias, este processo é contínuo desde que haja radiação solar, e é auto-regulado, com o aumento dos ganhos a originar o aumento do caudal no colector.

Se não houver radiação ou a temperatura no colector não for superior à do depósito, a circulação pára. Os colectores a funcionar neste tipo de sistemas necessitam de uma inclinação mínima de forma a promover o efeito de termossifão. Nos sistemas em circulação natural, comparativamente com os de circulação forçada, o caudal é menor e por isso a elevação de temperatura nos colectores é maior, e daí o sistema ser menos eficiente.

Na Figura 13 é representado um exemplo de um sistema solar térmico com circulação natural, instalado numa vivenda unifamiliar.



Figura 13: Exemplo de uma instalação solar térmica em termosifão, para AQS, numa habitação unifamiliar

2.5.2 Sistemas com circulação forçada

Em sistemas com circulação forçada, um fluido térmico com protecção anti-congelamento é movimentado no circuito primário, onde o seu calor, absorvido no colector solar, é transferido no permutador de calor para água potável. O fluido térmico mais utilizado é o propileno-glicol, e normalmente requer permutadores de calor de dupla parede. Estes podem ser localizados no interior do tanque de armazenamento, ou pode ser utilizado um permutador de calor externo. O circuito primário é fechado, de forma que necessita dum vaso de expansão e uma válvula de segurança. Podem ser utilizados um ou dois tanques de armazenamento. Na Figura 14 é representado um exemplo de um sistema solar térmico com circulação forçada, instalado numa vivenda unifamiliar.

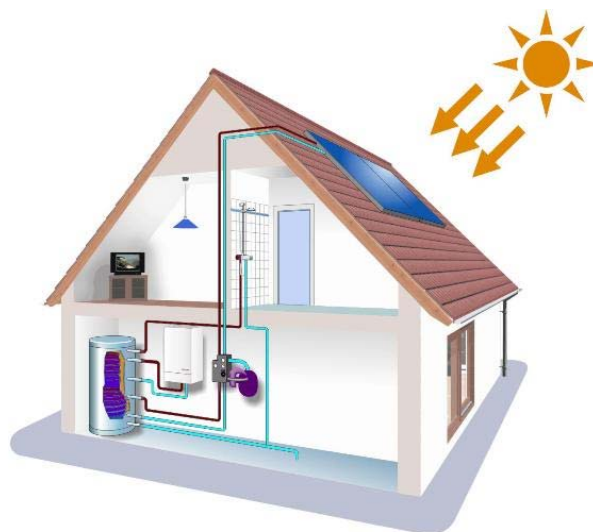


Figura 14: Exemplo de uma instalação solar térmica com circulação forçada, para AQS, numa habitação unifamiliar

2.6 Sistema solar térmico para climatização

Quando a energia solar é utilizada para aquecimento assim como para arrefecimento ambiente, pode ser aplicado o sistema de absorção representado na Figura 15.

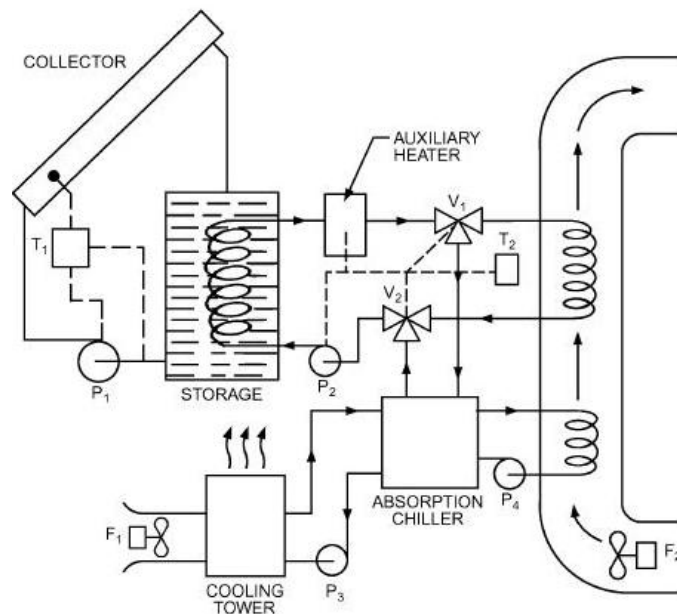


Figura 15: Sistema solar térmico para aquecimento e arrefecimento ambiente [9]

O colector e depósito têm que operar a uma temperatura próxima dos 90°C nos dias quentes de Verão, quando a água da torre de arrefecimento excede os 27°C, mas temperaturas mais baixas podem ser utilizadas quando água mais fresca é disponível através da torre. O EER (energy efficiency ratio) duma unidade típica de absorção de H₂O/LiBr pode atingir 0,75 em condições favoráveis, mas o frequente pára/arranca cíclico da máquina de forma a cobrir uma carga de arrefecimento muito variável, pode causar perdas significantes em termos de desempenho porque a unidade tem que ser aquecida até à temperatura de operação após cada desligamento. Sistemas modulares são analisados de modo diferente em relação aos sistemas pára-arranca.

Recentemente tem aumentado a aplicação de máquinas de absorção de duplo efeito, em que se consegue atingir um EER na ordem dos 1,3 ou até mais alto. Em sistemas solares, estas máquinas somente podem operar com colectores concentradores de calor devido às altas temperaturas requeridas. Há dois geradores a funcionar a níveis de temperatura diferentes, sendo que o gerador de alta temperatura opera a 150°C a alta pressão.

2.7 Sombreamentos entre filas de colectores

A separação entre filas de colectores faz-se de tal forma que às 12 horas solares do dia mais desfavorável (altura solar mínima no solstício de Dezembro) a sombra da aresta superior duma fila tem que projectar-se, no máximo, sobre a aresta inferior da fila seguinte [6]. Em sistemas com uso anual, o dia mais desfavorável corresponde a 21 de Dezembro.

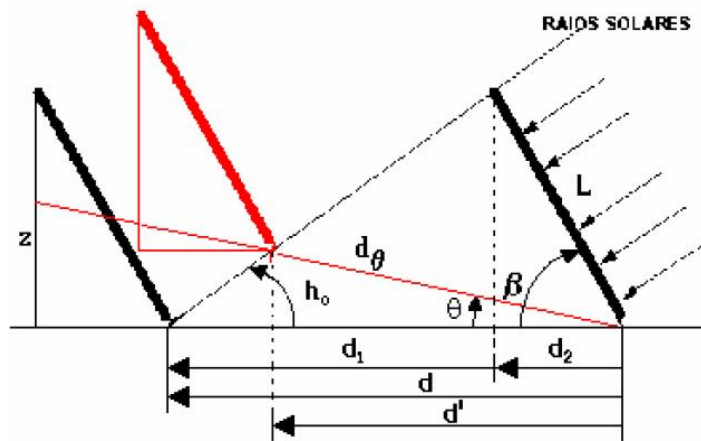


Figura 16: Cálculo de sombreamentos entre filas de colectores [6]

De acordo com a Figura 16, a distância mínima “d” entre filas de colectores instalados numa superfície horizontal é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$d = L \cdot \left[\frac{\sin(\beta)}{\tan(90^\circ - \text{lat} - 23,5^\circ)} + \cos(\beta) \right] \quad (16)$$

3 CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo serão apresentados os casos de estudo que foram analisados no âmbito deste trabalho. Os sistemas de energia solar térmica serão implementados em dois edifícios residenciais genéricos, sendo a geometria baseada nos edifícios utilizados no decorrer do Projecto RESHYVENT [18]. O primeiro edifício é uma habitação unifamiliar: uma vivenda com três pisos. O segundo edifício é uma habitação multifamiliar: um prédio de apartamentos com quatro pisos e dois apartamentos por piso.

Em ambos os edifícios foi seleccionada uma orientação norte-sul visto ser a mais aplicada na construção devido aos benefícios inerentes, em termos de necessidades de aquecimento e de arrefecimento. Considerou-se que os edifícios estão implantados numa zona urbana e que a sua construção é geminada, de modo que a envolvente exterior a este e oeste é totalmente homogénea.

Admitiu-se que as características da envolvente são independentes da sua localização, ocorrendo, somente, variações em termos de isolamento térmico da envolvente exterior e interior, conforme a zona climática de Inverno onde o edifício está localizado. Estas variações são realizadas com o critério de cumprimento da obrigatoriedade de N_{vc} ser inferior a N_v . Ambos os edifícios observam o RCCTE, verificação esta que se apresenta no capítulo seguinte.

3.1 Habitação unifamiliar

3.1.1 Caracterização geométrica

Neste estudo foi utilizado um edifício de referência com tipologia unifamiliar (Figura 17 e Figura 18) cuja planta se encontra representada na Figura 19. É constituído por três pisos e a fachada principal está orientada a sul. O edifício tem três quartos, um escritório e três casas de banho, uma delas de serviço, sendo a área total útil de pavimento de aproximadamente $132,5 \text{ m}^2$, e o pé-direito 2,5 m. O terceiro piso corresponde a um sótão não habitado sob uma cobertura inclinada cuja inclinação das vertentes é 25° . O desvão é acessível, podendo ser utilizado como zona de arrecadação ou espaço técnico.



Figura 17: Habitação unifamiliar - fachada sul

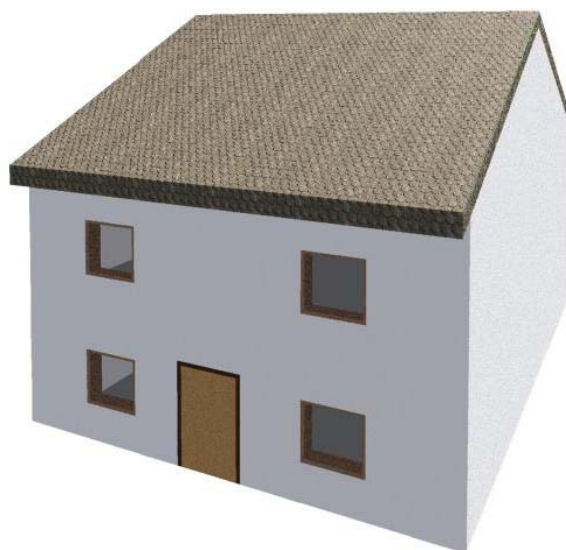


Figura 18: Habitação unifamiliar - fachada norte

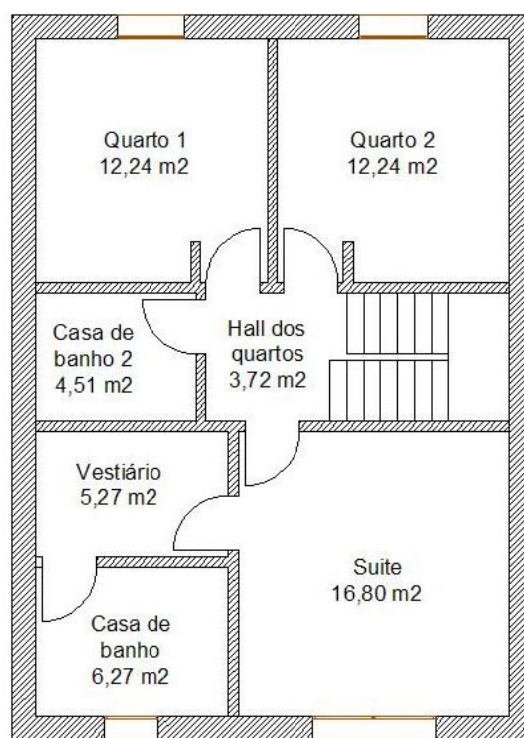
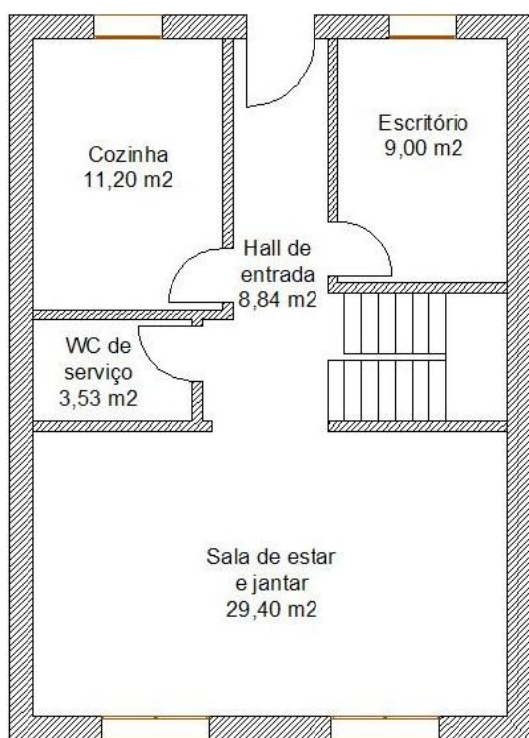


Figura 19: Planta da habitação unifamiliar

A Tabela 5 apresenta as áreas e volumes dos espaços pertencentes ao edifício, e na Figura 19 a respectiva planta. As portas, interiores e exterior, têm áreas de 1,8 m² (2x0,8 m) e 2 m² (2x1 m) respectivamente, e as janelas, situadas a 1 m de altura em relação à laje, possuem áreas variáveis consoante a sua orientação e o espaço que servem.

Tabela 5: Habitação unifamiliar: dimensões dos espaços do edifício e respectivas áreas de envidraçados

Espaços	Área útil [m ²]	Volume [m ³]	Área de envidraçados [m ²]
Sala de estar e jantar	29,4	73,5	6,4
Cozinha	11,2	28,0	1
WC de Serviço	3,5	8,8	-
Escritório	9,0	22,5	1
Hall de entrada	8,8	22,1	-
Escadas R/C	4,8	12,0	-
Suite	16,8	42,0	1,8
Casa de banho 1	6,3	15,7	0,64
Vestiário	5,3	13,2	-
Quarto 1	12,2	30,6	1
Quarto 2	12,2	30,6	1
Casa de banho 2	4,5	11,3	
Hall dos quartos	3,7	9,3	
Escadas 1º piso	4,8	12,0	
TOTAL	132,6	331,5	12,8

3.1.2 Caracterização da envolvente

As características da envolvente do edifício foram seleccionadas de acordo com as soluções construtivas tipicamente existentes em Portugal.

Assim, a solução de referência para a parede exterior, de acordo com Bragança [13], é a parede dupla de alvenaria de tijolo vazado com pano exterior de 15 cm e interior de 11 cm, separados por caixa-de-ar parcialmente preenchida por placas de isolante térmico. É uma solução que domina as soluções de fachadas nos edifícios em Portugal e representa-se na Figura 20.

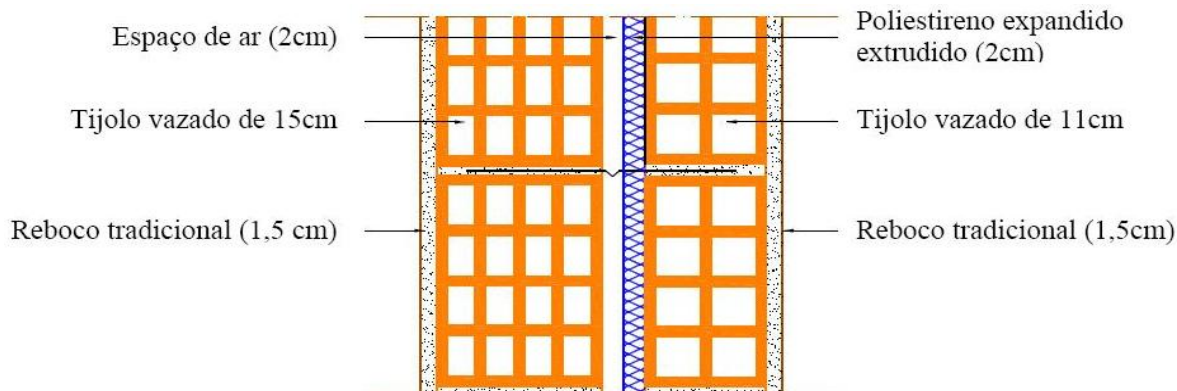


Figura 20: Parede dupla em alvenaria de tijolo vazado [13]

Na Tabela 6 são descritas as características [4] dos elementos da envolvente. Os materiais constituintes e as respectivas propriedades térmicas são apresentados do interior para o exterior dos espaços. São representados os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior e interior.

Tabela 6: Envolvente opaca do edifício unifamiliar

Elemento da envolvente	Material	e [m]	R [m².K/W]	ρ [kg/m³]	U [W/m².K]
Parede Exterior	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	I1 – 0,63
	Tijolo cerâmico furado 11mm	0,11	0,270	1100	
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	I1 – 0,02 I2 – 0,03 I3 – 0,06	e/0,037	32,5	I2 – 0,54
	Espaço de ar não-ventilado	0,02	0,175	1,23	I3 – 0,38
	Tijolo cerâmico furado 15 mm	0,15	0,390	1200	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
Cobertura inclinada – isolante sobre a esteira horizontal	Reboco tradicional	0,02		1900	I1 – 0,67
	Espaço de ar ventilado	0,02		1,23	
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	I1 – 0,05 I2 – 0,06 I3 – 0,08		32,5	I2 – 0,59
	Laje aligeirada de cerâmica	0,13		1800	I3 – 0,48
	Reboco tradicional	0,02		1900	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
Parede interior – tipo 1	Tijolo cerâmico furado 11 mm	0,11	0,270	1100	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
Parede interior – tipo 2	Tijolo cerâmico furado 11 mm	0,11	0,270	1100	
	Azulejo	0,02	0,015	2300	
	Azulejo	0,02	0,015	2300	
Parede interior – tipo 3	Tijolo cerâmico furado 11 mm	0,11	0,270	1100	
	Azulejo	0,02	0,015	2300	
	Azulejo	0,02	0,015	2300	
Laje de pavimento interior – tipo 1	Soalho em madeira (carvalho)	0,02	0,111	650	
	Betão armado	0,04	0,024	2150	
	Laje aligeirada de cerâmica	0,12	0,104	1800	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
Laje de pavimento interior – tipo 2	Ladrilho em cerâmica	0,02	0,017	1800	
	Betão armado	0,04	0,024	2150	
	Laje aligeirada de cerâmica	0,12	0,104	1800	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
Laje de pavimento em contacto com o solo	Soalho em madeira (carvalho)	0,02	0,111	650	
	Betão armado	0,04	0,024	2150	
	Laje aligeirada de cerâmica	0,12	0,104	1800	
	XPS	0,02	0,541	32,5	
Caixa de estore	Reboco interior	0,02	0,015	1900	0,74
	XPS	0,04	1,081	32,5	
Porta interior	Madeira semi-densa	0,05	0,28	700	
Porta exterior	Madeira semi-densa	0,05	0,28	700	2,23

A superfície exterior do edifício é de cor branca e as portas do edifício são de madeira maciça e têm 5 cm de espessura. Admitiu-se que o edifício não dispõe de dispositivos de admissão de ar na fachada, que a porta exterior não está bem vedada, e que para além dos

exaustores com funcionamento esporádico da cozinha, não existem outros dispositivos mecânicos para ventilação. A face superior do pavimento interior em contacto com o terreno está ao mesmo nível que a cota do terreno exterior.

Nos quartos, cozinha, sala e escritório, são utilizados envidraçados duplos com caixa de estore, 6 mm de lâmina de ar e caixilharia em alumínio (caixilho sem quadrícula) de classe 1, representando, esta última, 15% da área total do envidraçado. Enquanto na sala as janelas são de correr e o U é de $3,1 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ [4], as restantes são giratórias e o U é de $3,0 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ [4]. Em ambas o g_{\perp} (factor solar), é de 0,75 [1]. O vão envidraçado da casa de banho é em vidro simples acrílico opalino ($U = 1,95 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ [15]), não tem caixa de estore, e tem um factor solar de 0,50 [1].

Considerou-se que os dispositivos de oclusão nocturna (persianas exteriores em plástico) têm uma permeabilidade ao ar baixa. Em cada vão envidraçado existem cortinas interiores muito transparentes de cor clara, e por questões de privacidade considera-se que os sombreadores interiores permanecem 100 % activos durante todo o ano, e que representa um coeficiente de $g_{\perp} = 0,63$. Os dispositivos exteriores de sombreamento estão totalmente abertos durante a estação de aquecimento, e os envidraçados a sul têm palas horizontais, cujo ângulo medido a partir do ponto médio do vão envidraçado é 20° .

3.1.3 Perfis de consumo

3.1.3.1 Ganhos térmicos resultantes de fontes internas

Os ganhos térmicos internos incluem as fontes de calor localizadas no interior do edifício. São eles os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação. Note-se que estes ganhos são considerados úteis durante o Inverno, uma vez que reduzem o valor das necessidades de aquecimento, enquanto no Verão são indesejáveis, contribuindo para situações de sobreaquecimento. Foi considerado, de acordo com o RCCTE, um valor de ganhos internos médios por unidade de área útil de pavimento de 4 W/m^2 , numa base de 24 horas por dia, todos os dias do ano.

3.1.3.2 Águas quentes sanitárias

Conforme o RCCTE, “Águas quentes sanitárias” é a água potável a temperatura superior a 35°C utilizada para banhos, limpezas, cozinha e outros fins específicos, preparada em dispositivo próprio, com recurso a formas de energia convencionais ou renováveis.

De acordo com a tipologia (T3) do edifício, considera-se que é habitado por 4 pessoas. O consumo médio diário de referência estipulado pelo RCCTE é de 40 litros a 60°C por dia, por ocupante nominal, sendo o perfil de consumo de AQS, o descrito na Tabela 7.

Tabela 7: Perfil de consumo de AQS da habitação unifamiliar

2ª-feira a 6ª-feira		Sábado e Domingo	
Hora	Consumo (litros)	Hora	Consumo (litros)
07 - 08	80	09-10	80
18 - 19	80	18-19	80

3.1.4 Sistema de climatização

O edifício tem um sistema de climatização que permite manter o seu interior a uma temperatura de 20°C durante a estação de aquecimento, e 25°C durante a de arrefecimento. O equipamento para aquecimento consiste numa caldeira a gás natural, com um rendimento nominal de 87% e o equipamento para arrefecimento consiste numa máquina frigorífica com um EER de 3.

3.2 Habitação multifamiliar

3.2.1 Caracterização geométrica

A habitação multifamiliar consiste num edifício com oito apartamentos distribuídos por quatro pisos, todos eles com a mesma configuração. O edifício está dividido numa zona este e numa oeste através dum vão de escadas comum sem abertura directa para o exterior. Os apartamentos têm uma área útil de pavimento de cerca de 85 m² e pé-direito de 2,5 m. São constituídos por três quartos, uma sala, cozinha e duas casas de banho. Têm duas frentes, encontrando-se a sala orientada a sul. A cobertura do edifício é horizontal, e existe uma garagem colectiva no piso (-1). A planta do rés-de-chão é representada na Figura 21.

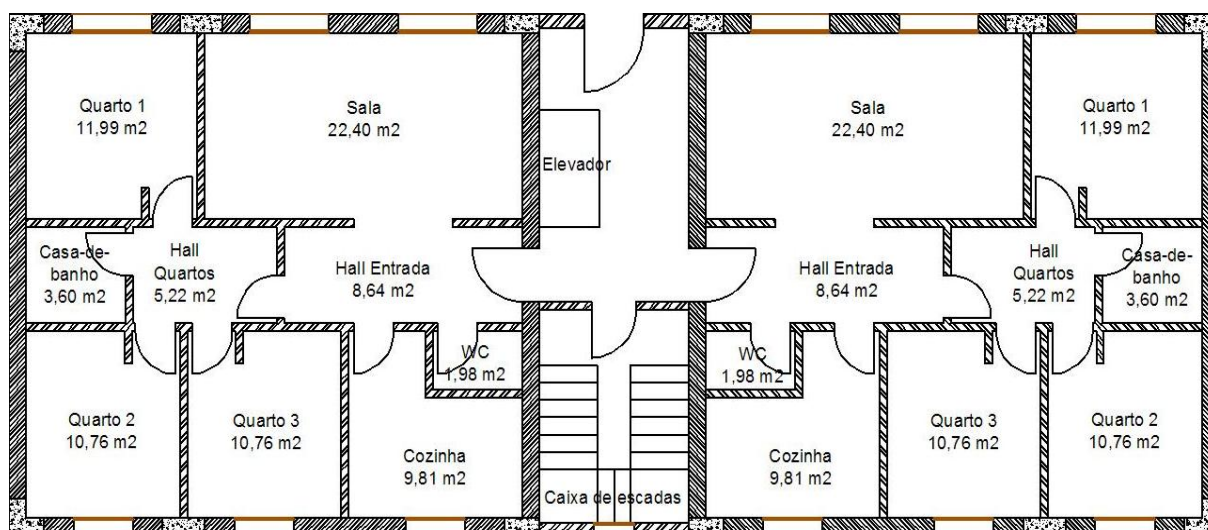


Figura 21: Planta do rés-de-chão do edifício multifamiliar

A Tabela 8 apresenta as áreas e volumes dos espaços de cada apartamento, e na Figura 21 a respectiva planta do rés-de-chão do edifício, que apresenta, no que diz respeito às portas e janelas, a mesma configuração que na habitação unifamiliar.

Tabela 8: Habitação multifamiliar: dimensões dos espaços dos apartamentos e respectivas áreas de envidraçados

	Área útil [m ²]	Volume [m ³]	Área de envidraçados [m ²]
Sala	22,4	56,0	3,2
Quarto 1	12,0	30,0	1,6
Casa de Banho	3,6	9,0	-
Quarto 2	10,8	26,9	1,2
Quarto 3	10,8	26,9	1,2
Cozinha	9,8	24,5	1,2
WC serviço	2,0	5,0	-
Hall entrada	8,6	21,6	-
Hall quartos	5,2	13,0	-
TOTAL	85,2	212,9	8,4

3.2.2 Caracterização da envolvente

A envolvente dos espaços úteis do edifício é semelhante à utilizada na habitação unifamiliar. Foi incluída a lã de rocha nos elementos horizontais que separam os vários pisos onde estão localizadas as fracções autónomas, com o objectivo de melhorar o desempenho acústico do edifício, embora não influencie o desempenho energético do mesmo.

Apesar de, ao abrigo do RCCTE, não ser necessária a caracterização dos elementos exteriores dos espaços não úteis, nomeadamente o vão de escadas e a garagem colectiva, para efectuar a simulação dinâmica do edifício é necessário efectuar essa definição.

Por uma questão de iluminação natural diurna do vão de escadas, este possui um vão envidraçado vertical (área = $0,64 \text{ m}^2$; $U = 5,68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $g_{\perp} = 0,855$) em cada um dos pisos, e um vão envidraçado horizontal (área = 4 m^2 ; $U = 1,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $g_{\perp} = 0,589$) na cobertura. O pavimento da garagem é rebocado interiormente, tendo sido considerado uma temperatura de fronteira de 15°C para o solo (terra), e para toda a envolvente em contacto com o solo. Na garagem existem também 6 vãos envidraçados verticais (área = 1 m^2 ; $U = 5,68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $g_{\perp} = 0,855$) para iluminar naturalmente o espaço.

Tabela 9: Envolvente opaca exterior e interior do edifício multifamiliar

Elemento da envolvente	Material	e [m]	e/λ [m².K/W]	ρ [kg/m³]	U [W/m².K]
Parede Exterior	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	I1 – 0,63
	Tijolo cerâmico furado 11mm	0,11	0,270	1100	
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	I1 – 0,02	e/0,037	32,5	I2 – 0,54
		I2 – 0,03			
		I3 – 0,04			
	Espaço de ar não-ventilado	0,02	0,175	1,23	I3 – 0,47
	Tijolo cerâmico furado 15 mm	0,15	0,390	1200	
Reboco tradicional	0,02	0,015	1900		
Cobertura horizontal (em terraço)	Camada de seixo	0,05			I1 – 0,65
	Sistema de impermeabilização	0,01			
	Poliestireno expandido moldado (EPS)	I1 – 0,03			I2 – 0,55
		I2 – 0,04			
		I3 – 0,06			
	Betão cavernoso inertes argila	0,10		700	I3 – 0,42
	Laje aligeirada betão normal	0,13		2150	
Reboco tradicional	0,02		1900		
Caixa de estore	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	0,92
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,03	0,811	32,5	
Pilar de betão armado	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	0,84
	Tijolo de revestimento	0,04	0,035	1800	
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,03	0,811	32,5	
	Laje de betão armado	0,24	0,145	2150	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
	Parede entre apartamentos e vão de escadas	Reboco tradicional	0,02	0,015	
Tijolo cerâmico furado 11mm		0,11	0,270	1100	
Pano de betão		0,20	0,12	2150	
Reboco tradicional		0,02	0,015	1900	
Laje entre piso 0 e garagem (espaço não útil)	Soalho em madeira (carvalho)	0,02	0,111	650	I1 – 0,68
	Betonilha	0,05	0,030	2150	
	Aglomerado negro de cortiça	I1 - 0,04	e/0,041 [7]	400	I2 – 0,68
		I2 - 0,04			
		I3 - 0,06			
	Laje maciça de betão	0,22	0,133	2150	I3 – 0,51
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	
Parede exterior de vão escadas e garagem	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	1,42
	Tijolo cerâmico furado 22mm	0,22	0,520	1200	
	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	

A Tabela 9 apresenta as características dos elementos da envolvente [4]. As restantes características do edifício seguem uma filosofia semelhante à apresentada na habitação unifamiliar. Saliente-se somente que neste caso, as janelas são todas giratórias e as caixilharias não têm classe atribuída.

Os perfis de consumo de AQS em cada um dos oito apartamentos são iguais aos da habitação unifamiliar.

3.2.3 Sistema de climatização

Foram implementadas duas soluções de acordo com as análises que serão realizadas no próximo sub-capítulo. Na primeira, em que o sistema solar térmico do edifício funciona somente para produzir AQS, o equipamento de aquecimento consiste num aparelho eléctrico que produz calor através de efeito de Joule com uma eficiência de 100% e o equipamento de arrefecimento consiste numa máquina frigorífica com um EER de 3. Na segunda solução, em que o sistema solar térmico também apoia o sistema de climatização, o equipamento considerado para aquecimento consiste numa caldeira a gás natural com um rendimento de 87%. Na estação de arrefecimento, a caldeira alimenta uma máquina de absorção com um EER de 0,7.

3.3 Sistemas solares térmicos

Foram considerados quatro sistemas solares térmicos distintos neste estudo, nomeadamente uma instalação solar para produção de AQS com circulação forçada e outra com circulação natural na vivenda unifamiliar, uma instalação solar colectiva para produção centralizada de AQS no edifício multifamiliar, e uma instalação solar para produção centralizada de AQS e apoio aos sistemas de aquecimento e arrefecimento ambiente do edifício multifamiliar. Foram, ainda, caracterizadas todas as variáveis influenciadoras da análise energética dos sistemas.

Considerou-se sempre que os colectores solares estão orientados a sul (azimute nulo), de modo a maximizar a captação de radiação solar anual. Admitiu-se que as obstruções e sombreamentos do horizonte constituem uma altura angular constante de 3° em todos os casos estudados, o que tem um efeito prático desprezável, tal como é representado na Figura 22.

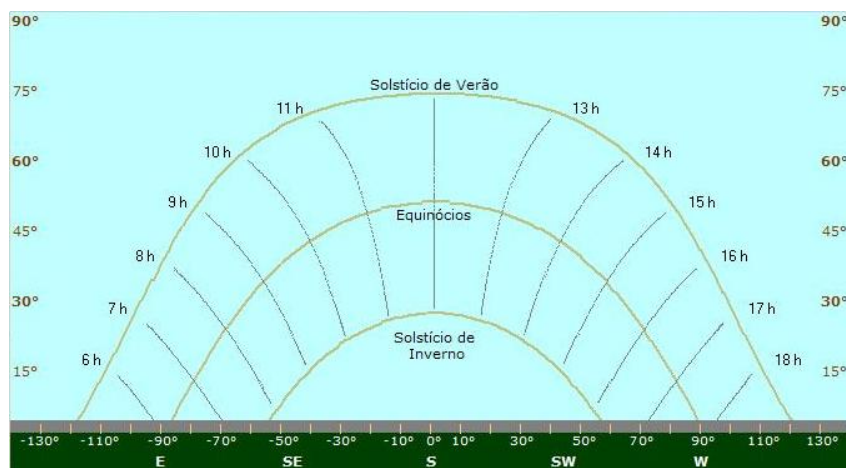


Figura 22: Obstrução horizontal de 3° considerada nos sistemas solares térmicos estudados

Nos casos em que a circulação no circuito primário é forçada, foi considerada uma disposição vertical dos depósitos de armazenamento de energia, e a existência de deflectores internos de modo a favorecer a estratificação térmica da água acumulada, e desta forma obter temperaturas mais altas da água na camada superior do depósito. Admitiu-se também que os depósitos estão colocados no interior, com uma temperatura média ambiente de 21°C, e que são constituídos por um material considerado médio condutor de calor. Parte-se do pressuposto que todas as redes de distribuição de água quente internas às fracções autónomas são isoladas com pelo menos 10 mm de isolamento térmico, de acordo com recomendações do RCCTE.

O fluido circulante no circuito primário é uma mistura de água com propileno-glicol (anticongelante), em que a sua percentagem é função da temperatura de congelação pretendida. Nos casos de estudo, considerou-se que uma concentração volúmica de 25% é adequada à gama de temperaturas mínimas do ar ambiente. Sob o ponto de vista energético, o principal efeito do anticongelante, com capacidade calorífica menor que a água, é aumentar um pouco a temperatura do circuito primário e assim promover as perdas térmicas ligeiramente. O desempenho do sistema é mais sensível à especificação do caudal. Este foi seleccionado de acordo com o proposto pelo software de simulação energética utilizado, que executa um cálculo interno de acordo com as características do colector, incluindo um critério de limitação da temperatura máxima atingida nos colectores.

As propriedades do fluido do circuito primário utilizadas no procedimento de cálculo estão presentes na Tabela 10. Considerou-se uma temperatura de 20°C para as propriedades dependentes da temperatura, visto ser uma estimativa minimamente aceitável para a qual o motor da bomba circuladora arranca. Normalmente este valor é superior, mas por uma questão de segurança opta-se pelo valor mínimo, visto o coeficiente de viscosidade aumentar bastante com o decréscimo da temperatura do fluido.

Tabela 10: Propriedades do fluido térmico [mistura água + propileno-glicol] considerado na simulação [8]

Concentração glicol	25%
Ponto de congelação	-10 °C
Ponto de ebulição	101,1 °C
Cp [20°C]	3911 J/kg.K
ρ [20°C]	1023,68 kg/m³
μ [20°C]	2,54.10⁻³ Pa.s
ν [20°C]	2,48.10⁻⁶ m²/s

3.3.1 Sistema solar térmico para produção de AQS do edifício unifamiliar

Na habitação unifamiliar foram consideradas duas instalações solares distintas, uma em que no circuito primário a circulação é forçada, e outra em que é natural.

De acordo com a tipologia do edifício, e os consumos nominais previstos em conformidade com o RCCTE, considerou-se uma área colectora útil de 4 m² sendo o consumo diário de água sanitária de 160 litros a 60°C, admitindo-se ainda, uma temperatura anual de 15°C para a água de abastecimento proveniente da rede pública. O perfil horário de consumos foi caracterizado na descrição do edifício correspondente.

Supõe-se que em ambas as instalações o apoio energético consiste num acumulador eléctrico com 5 cm de isolamento e cuja eficiência, de acordo com o RCCTE, é de 90%. A inclinação dos colectores considerada foi o ângulo igual à latitude do local reduzido de 5°. É a inclinação óptima do ponto de vista de contribuição energética anual de um sistema solar para produção de AQS sem perfil de consumo sazonal [6].

3.3.1.1 Sistema solar com circulação forçada

No sistema solar térmico para produção de AQS com circulação forçada, cujo esquema se apresenta na Figura 23, foi analisada a utilização de três tecnologias distintas de colectores solares térmicos:

- Plano selectivo
- Concentrador parabólico composto (CPC)
- Tubos de vácuo

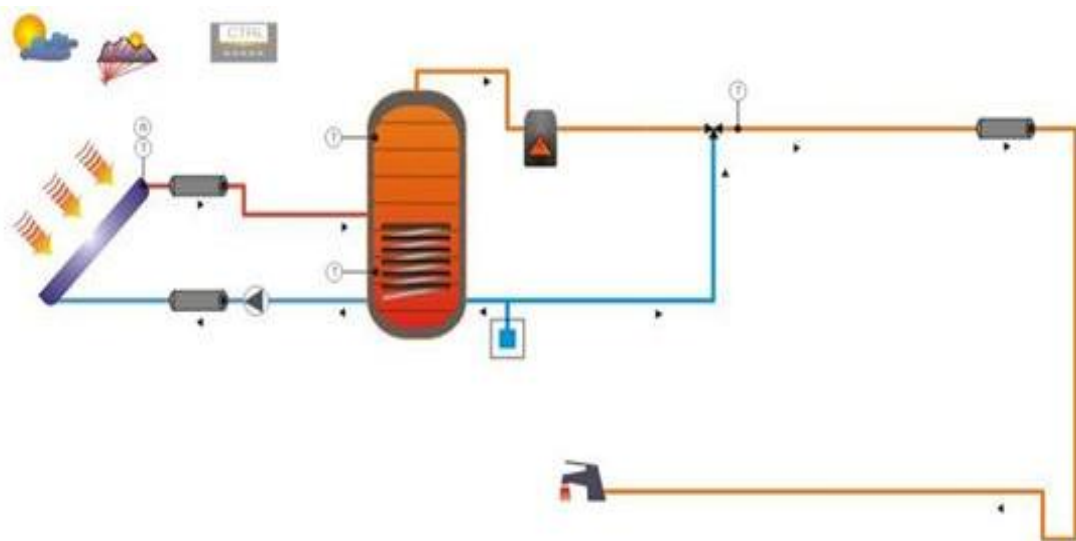


Figura 23: Esquema do sistema solar térmico (c/ circulação forçada) para AQS no edifício unifamiliar [24]

As características ópticas, e térmicas, do colector plano selectivo, e de tubos de vácuo, são as típicas dos colectores solares das duas tecnologias existentes no mercado actual. Para tipificar os colectores, analisou-se uma amostra considerável dentro dos que são comercializados em Portugal e certificados segundo a marca “Solar Keymark”, e retirou-se os valores médios relativos às perdas ópticas e térmicas. As características do colector CPC são as do modelo 3E+ da Ao Sol, fabricante português de colectores solares, e cujo certificado do colector foi emitido em Novembro de 2007.

Considerou-se um depósito com um volume de 300 litros de modo a que a água acumulada tenha energia armazenada suficiente para satisfazer as necessidades dos utilizadores durante períodos de ausência, ou escassez, de radiação solar, especialmente nos dias de Verão em que a irradiação solar é menor. O volume foi escolhido de acordo com o critério estabelecido em [6], que consiste num volume de acumulação de 60 a 90 litros/m² de colector em sistemas onde as diferenças entre captação e consumo não são superiores a 24 horas. Admitiu-se que o permutador de calor onde é feita a permuta de energia entre o fluido primário e a água para consumo, é um permutador interno com uma configuração em serpentina e eficiência de 50%. Relativamente à tubagem, assumiu-se que possui um comprimento de 14 metros, sendo que 2,5 metros ocorrem no exterior no edifício. As perdas térmicas na tubagem e no depósito, juntamente com o caudal no circuito primário e as características dos colectores, são representados na Tabela 11.

Tabela 11: Características dos colectores e da instalação com circulação forçada no edifício unifamiliar

Tecnologia dos colectores	Área de abertura [m ²]	Características dos Colectores			Modif. ângulo 50°	Características da Instalação		
		η_0	a_1 [W/m ² .K]	a_2 [W/m ² .K ²]		Caudal [l/h/m ²]	Perdas depósito [W/K]	Perdas tubagem [W/K]
Plano selectivo	2,0	77,5%	3,85	0,015	0,92	44,4	2,0	3,2
CPC	2,0	71,7%	4,00	0,010	0,93	43,5	2,0	3,2
Tubos de vácuo	2,0	73,5%	1,35	0,005	0,92	15,5	2,0	3,2

3.3.1.2 Sistema solar com circulação natural

Na sistema solar térmico para produção de AQS com circulação natural, cujo esquema se apresenta na Figura 24, foi considerado um sistema com características genéricas de acordo com os existentes no mercado português de “kits termossifão”. Optou-se pelo kit Solahart - 302J visto ter um desempenho médio em relação aos demais.

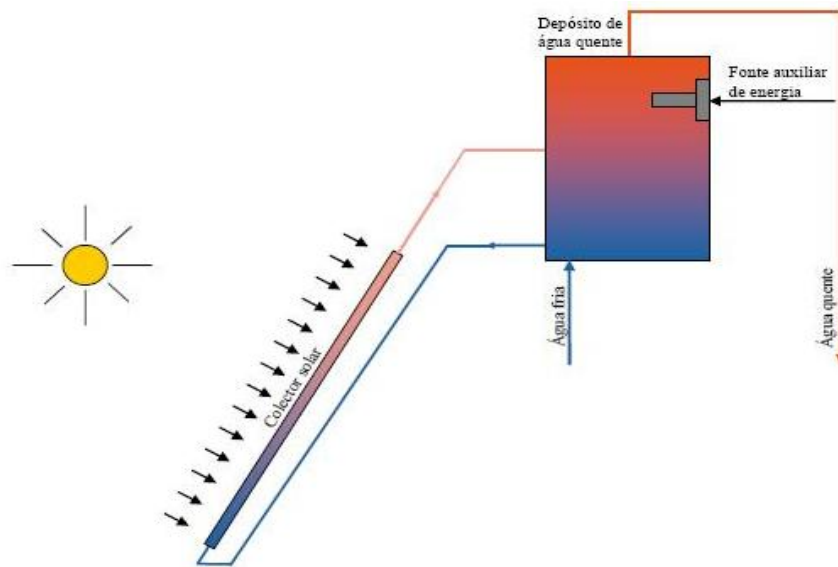


Figura 24: Esquema do sistema solar térmico (c/ circulação natural) para AQS no edifício unifamiliar [17]

Neste tipo de instalação, os componentes coletor/permutador/depósito encontram-se integrados, e são colocados no exterior do edifício. Considerou-se um depósito com um volume de 200 litros, inferior ao depósito do sistema com circulação forçada visto que a experiência demonstra que a contribuição energética solar do “kit termossifão” será inferior e, deste modo, volumes maiores seriam excessivos [7].

De acordo com as características do kit Solahart, e dados dos ensaios de extracção de energia, na Tabela 12 são representadas as características do kit utilizadas na simulação.

Tabela 12: Características da instalação solar térmica com "kit termossifão" no edifício unifamiliar

Área de abertura [m ²]	a0 [MJ]	aH [m ⁻²]	aT [MJ/°C]	Perdas depósito [W/K]
2	-2,5	1,4	0,6	4,4

3.3.2 Sistema solar térmico para produção de AQS no edifício multifamiliar

No edifício multifamiliar foi considerada uma instalação solar colectiva para produção de AQS, com o objectivo de efectuar uma análise da influência em termos de classificação energética, e de acordo com o espaço disponível para a instalação de colectores solares térmicos na cobertura do edifício. Para a análise de disponibilidade física de espaço e eficiência, fez-se variar o número de pisos do edifício entre quatro, valor mínimo médio, e dez, podendo na realidade existir edifícios com mais pisos.

O estudo foi feito considerando a localização do edifício no Concelho do Porto e, de acordo com o critério seguido para a habitação unifamiliar, optou-se por um ângulo de inclinação dos colectores de 36°.

Efectuando o cálculo para determinar o espaçamento entre filas de colectores para que às 12 horas (TSV) do Solstício de Inverno não haja sobreamentos entre as fileiras, e considerando a existência de impedimentos arquitectónicos que criam obstáculos efectivos à colocação de colectores solares tais como caixas de escadas e de elevadores, verificou-se que o espaço disponível no terraço do edifício permite instalar um máximo de 64 m² de área colectora útil (área de abertura do colector).

Supõe-se que o apoio energético é individual para cada FA, e consiste num acumulador eléctrico com 5 cm de isolamento, e cuja eficiência é de 90% [1]. Esta opção teve o intuito de penalizar o desempenho energético do edifício, para ficar com uma classificação mínima B⁻.

Considerou-se o esquema de princípio representado na Figura 25. Existem outras configurações possíveis, mas em termos de análise energética, o software de simulação utilizado não faz distinção.

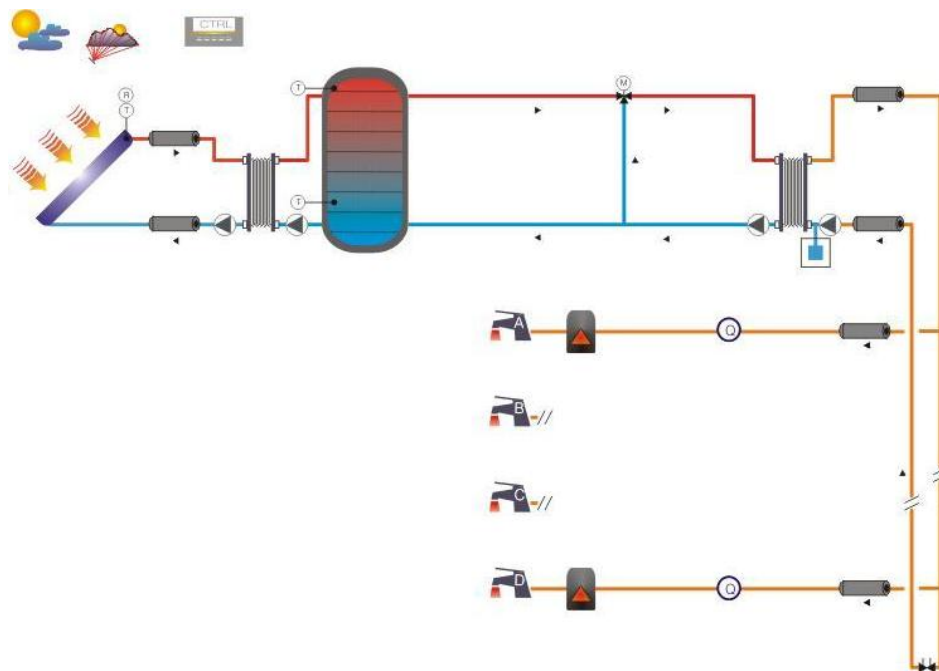


Figura 25: Esquema do sistema solar térmico para produção centralizada de AQS no edifício multifamiliar [17]

De acordo com a tipologia das fracções autónomas e a variação do número de pisos do edifício, variou-se também os consumos nominais previstos, na ordem dos 40 litros por dia e por ocupante a 60°C, admitindo-se uma temperatura anual de 15°C para a água de abastecimento proveniente da rede pública, em conformidade com o RCCTE. Considerou-se, ainda, que o sistema adoptado distribui equitativamente a água quente solar por todas as

fracções. O perfil horário de consumos em cada apartamento é igual ao da habitação unifamiliar, e foi caracterizado na Tabela 7.

O sistema de armazenamento de energia é composto por um depósito centralizado que fornece a água quente sanitária às várias habitações, cujo volume varia consoante o aumento do consumo previsto devido à variação do número de pisos do edifício e consequente número de ocupantes. As perdas de energia do depósito, e da tubagem, estão descritas na Tabela 13. Considerou-se um permutador de placas externo com uma eficiência de 75%, com a responsabilidade de efectuar a troca de calor entre o circuito primário e o depósito centralizado de AQS.

Neste sistema foram implementados dois tipos de colectores solares térmicos, cujas características juntamente com as da instalação, são representadas na Tabela 13.

Tabela 13: Características dos colectores e da instalação para produção de AQS no edifício multifamiliar

Colectores estudados	Características dos Colectores					Características da Instalação		
	Área de abertura [m ²]	η_0	a_1 [W/m ² .K]	a_2 [W/m ² .K ²]	Modif. Ângulo 50°	Caudal [l/h/m ²]	Perdas depósito [W/K]	Perdas tubagem [W/K]
Plano selectivo	2,0	77,5%	3,85	0,015	0,92	44,4	6,0	31,3
Padrão ADENE	2,0	69,0%	7,50	0,014	0,87	79,0	6,0	31,3

Foram efectuadas seis análises distintas, entre as quais a “solução alternativa” proposta pela ADENE e já referenciada no capítulo 1.4.3, e que foram as seguintes:

Análise 1 - Instalação com colector “Padrão ADENE” e aplicação da regra de 1 m² de colector por ocupante nominal, ocupando um máximo de 50% da área disponível na cobertura.

Análise 2 - Instalação com colector “Plano selectivo” e aplicação da regra de 1 m² de colector por ocupante nominal, ocupando um máximo de 50% da área disponível na cobertura.

Análise 3 - Instalação com colector “Plano selectivo” e aplicação da “solução alternativa”, com 50% da área da cobertura disponível, e utilizando a área colectora mínima possível.

Análise 4 - Instalação com colector “Padrão ADENE” e aplicação da regra de 1 m² de colector por ocupante nominal, ocupando o máximo de área disponível na cobertura.

Análise 5 - Instalação com colector “Plano selectivo” e aplicação da regra de 1 m² de colector por ocupante nominal, ocupando o máximo de área disponível na cobertura.

Análise 6 - Instalação com colector “Plano selectivo” e aplicação da “solução alternativa”, com 100% da área da cobertura disponível, e utilizando a área colectora mínima possível.

3.3.3 Sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização do edifício multifamiliar

O caso de estudo analisado com mais detalhe foi o sistema de energia solar térmica para produção de água quente sanitária e apoio aos equipamentos de climatização do edifício multifamiliar.

Neste sistema foi avaliada a implementação de dois tipos diferentes de colectores solares térmicos, nomeadamente, o “Plano selectivo” e os “Tubos de vácuo”, cujas características consideradas neste estudo já foram referidas no capítulo 3.3.1.1.

Através da análise das necessidades energéticas do edifício nas várias localizações estudadas, verificou-se que as necessidades da estação de aquecimento são largamente superiores às de arrefecimento, sendo estas últimas diminutas em certos casos. Desta forma, considerou-se uma inclinação de 55° para os colectores solares [6], de modo a aproveitar a trajectória do sol no Outono e Inverno, elevando a quantidade de radiação solar captada na estação de aquecimento e a consequente contribuição energética do solar térmico para as necessidades de aquecimento.

O esquema da instalação apresenta-se na Figura 26, onde a energia útil captada nos colectores solares é transferida para um depósito inercial em que a água contida no seu interior é recirculada para transferir energia, conforme as necessidades energéticas do edifício, tanto de AQS como de climatização. A permuta de calor entre os colectores e o depósito é realizada com um permutador de placas externo, com uma eficiência nominal de 75%.

O sistema de produção centralizada de AQS funciona de modo independente dos sistemas de climatização, sendo o depósito de acumulação de AQS dimensionado de acordo com os consumos previstos. O tanque é abastecido com água fria da rede à temperatura sugerida pelo software utilizado na análise energética, para cada localização estudada, sendo esses valores correspondentes a temperaturas médias mensais do solo, estimadas para dois metros de profundidade. Um permutador de placas externo com eficiência de 75% é responsável pela permuta de calor entre o depósito inercial e o depósito de AQS. Assumiu-se que o sistema energético de apoio à preparação de AQS é individual para cada FA, e consiste num esquentador a gás natural com chama modulante. Nos termos do RCCTE, considerou-se um rendimento nominal de 50% para este aparelho. Adiante serão considerados outros sistemas com uma maior eficiência de conversão de energia.

O sistema de produção centralizada de calor consiste numa caldeira a gás natural com uma eficiência nominal, admitida, de 87%, instalada a jusante do depósito inercial integrado no sistema solar térmico, também responsável pelo apoio ao aquecimento. A caldeira tem uma potência de acordo com a carga térmica máxima de aquecimento do edifício, e afectada do rendimento do equipamento. A água recirculada é aquecida até 45°C e alimenta um circuito de piso radiante instalado em cada FA. Este sistema é bem adaptado à utilização de sistemas solares devido à baixa temperatura de retorno, quando comparado com radiadores de aquecimento ambiente que necessitam de temperaturas mais elevadas e que têm também temperaturas de retorno superiores [25].

O sistema de produção centralizada de água refrigerada consiste num chiller que funciona com um ciclo de absorção de $H_2O/LiBr$ de efeito simples e com um EER de 0,7, e cujo gerador da máquina é alimentado com água a $88^\circ C$ proveniente do depósito inercial integrado no sistema solar térmico. A jusante do depósito, e a montante do chiller, encontra-se a caldeira a gás natural que cobre a potência necessária em caso de insuficiência por parte dos colectores solares. O chiller tem uma potência de acordo com a carga térmica máxima de arrefecimento do edifício e afectada do EER do equipamento. A máquina de absorção alimenta um conjunto de ventiloconvectores instalados em cada FA com água refrigerada a $7^\circ C$.

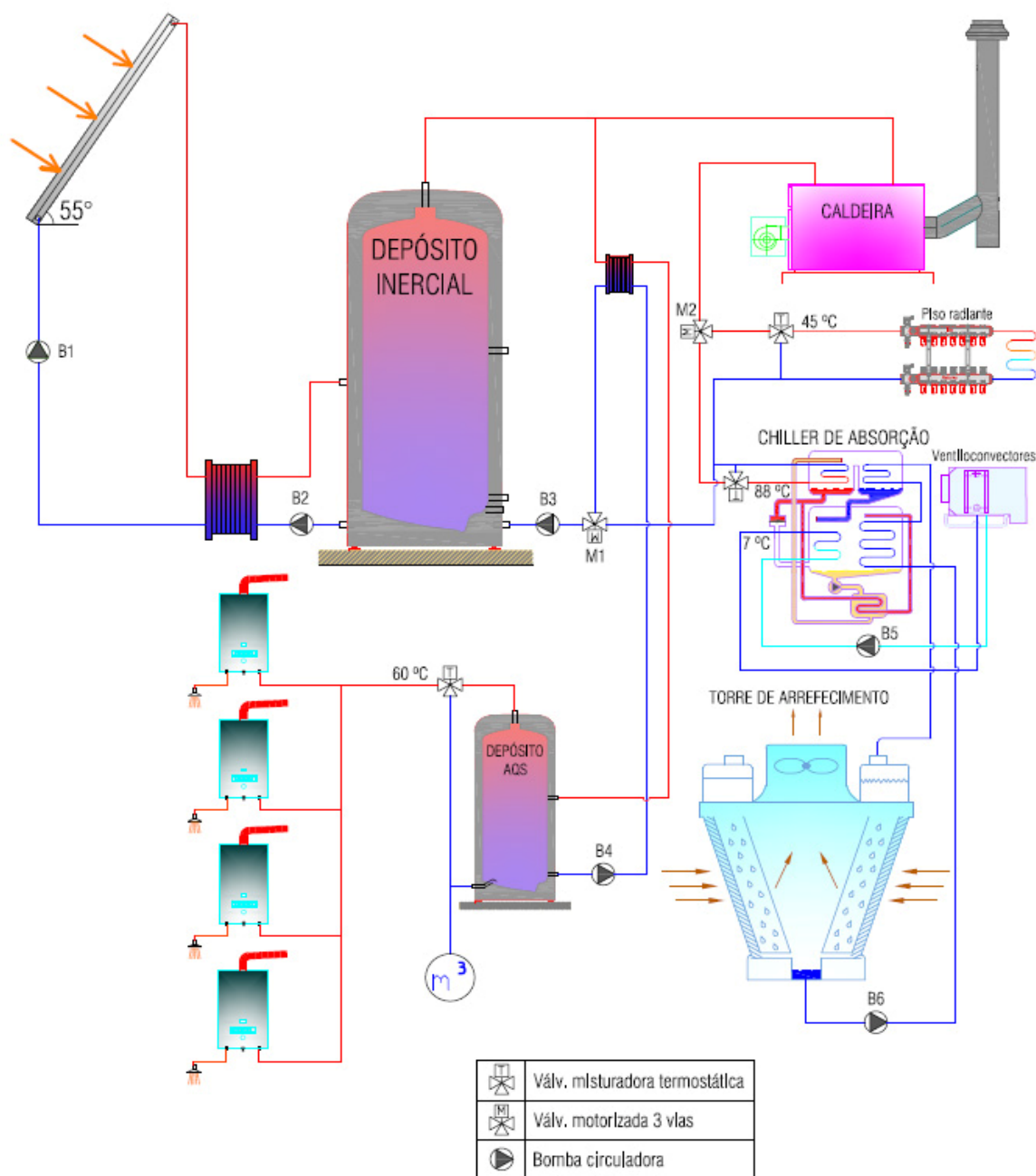


Figura 26: Esquema de princípio do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio aos sistemas de climatização do edifício multifamiliar

3.3.3.1 Descrição do controlo do sistema

Para uma melhor interpretação da instalação, e do funcionamento, de todo o sistema, são seguidamente descritas as considerações feitas para o procedimento de controlo, que é assegurado por um elemento electrónico (controlador PID) com entradas para sondas de temperatura e saídas de relé para controlo das bombas circuladoras e das válvulas motorizadas de 3 vias. A partir da leitura das temperaturas e da regulação do programa, são dadas ordens de “on” ou “off” através das saídas de relé.

Quando existe uma diferença de temperaturas positiva a partir de 10°C, entre o fluido térmico à saída do conjunto dos colectores solares e a água localizada na região inferior do depósito inercial, ambos os motores das bombas circuladoras B1 e B2 arrancam em simultâneo (estão “ligados” electricamente) e debitando o mesmo caudal, ocorrendo permuta de calor entre o circuito primário e o depósito inercial. Desligam quando a diferença de temperaturas é inferior a 5°C. Ambas funcionam com variador de frequência de modo a equilibrar a diferença de temperaturas de acordo com a radiação solar disponível no momento, para além de reduzir o consumo eléctrico da instalação.

O controlo do sistema solar térmico coloca a produção de AQS com prioridade sobre o apoio à climatização do edifício, sendo a válvula motorizada de 3 vias M1 configurada para esse efeito. A bomba B3 funciona quer o sistema solar esteja a alimentar o depósito de AQS ou os sistemas de produção de frio e calor. A bomba B4 arranca sempre que haja entalpia favorável entre o depósito inercial e o depósito de AQS, e desliga quando é atingida a temperatura pretendida, nomeadamente 60°C de temperatura média de toda a água acumulada no depósito de AQS. Quando há consumo de AQS numa determinada habitação, se a água proveniente do depósito não estiver a 60°C, entra em funcionamento o esquentador a gás natural de chama modulante localizado na respectiva habitação, e colocado em série e a jusante do depósito de AQS.

Quando a AQS está “satisfeita”, o sistema solar térmico, através do controlo da válvula M1, passa a alimentar directamente os sistemas de climatização. A jusante do depósito inercial, está colocada a caldeira central a gás natural que arranca sempre que a água procedente do depósito inercial não se encontra à temperatura pretendida, nomeadamente 45°C para a estação de aquecimento, e 88°C para a estação de arrefecimento, complementando a potência requerida. A válvula de 3 vias M2 é configurada para separar a alimentação do sistema de aquecimento do de arrefecimento, conforme as necessidades climáticas do edifício. O aquecimento das fracções autónomas é realizado através dum sistema de piso radiante, alimentado com água quente a 45°C, e cujo caudal é variado conforme as necessidades energéticas instantâneas. A refrigeração é produzida no evaporador do chiller, cujo gerador é alimentado com água quente a 88°C. A bomba B5 é responsável pelo transporte de “frio” aos ventiloconvectores, e arranca em simultâneo com a bomba B6, que permite que o conjunto condensador/absorvedor da máquina de absorção seja arrefecido a água por meio de uma torre de arrefecimento.

3.3.3.2 Descrição dos parâmetros relevantes à análise energética do sistema

Como verificado anteriormente, a cobertura do edifício multifamiliar permite instalar uma área colectora máxima de 64 m². Será analisado o desempenho do sistema para 5 áreas colectoras diferentes, nomeadamente 32 m², 40 m², 48 m², 56 m² e 64 m².

O depósito inercial foi dimensionado segundo [3], que sugere um valor entre 60 a 90 l/m² de área colectora, para situações em que as diferenças entre captação e consumo não são superiores a 24 horas. O mesmo Manual afirma que a partir de 60 litros por m² de colector, apesar de maiores volumes de armazenamento reduzirem os desperdícios energéticos, a energia útil pouco aumenta. Desta forma admitiu-se um valor mínimo de acumulação de 60 l/m² de área colectora para a instalação com o colector “plano selectivo”, e 75 l/m² de área colectora para a instalação com o colector “tubos de vácuo”, devido ao melhor rendimento deste último assumindo as mesmas condições de instalação, de consumo, e de ambiente.

Na Tabela 14 apresentam-se as características do depósito inercial consideradas para as várias situações estudadas, tendo sido admitida uma perda térmica específica de 0,7 W/m²/K para as paredes do depósito.

Tabela 14: Características do depósito inercial para as várias situações estudadas

Área colectora [m ²]	Plano selectivo		Tubos de vácuo	
	Volume Depósito [l]	Perdas depósito [W/K]	Volume Depósito [l]	Perdas depósito [W/K]
32	2000	9,2	2500	10,5
40	2500	10,5	3000	11,7
48	3000	11,7	3500	17,0
56	3500	17,0	4500	19,7
64	4000	18,4	5000	20,9

Apesar das características hidráulicas da instalação não terem uma influência significativa no desempenho térmico do sistema, devido à complexidade e dimensão da instalação, foi calculado o diâmetro e isolamento da tubagem principal do circuito primário de modo a quantificar as perdas térmicas no transporte de calor entre os colectores solares e o depósito inercial.

Considerou-se que os colectores solares foram instalados com alimentação invertida de modo a que o circuito primário resulte hidraulicamente equilibrado, e com as menores perdas térmicas possíveis, de acordo com o sugerido em [6]. Admitiu-se um comprimento total de tubagem de 100 metros, sendo que 30 metros estão localizados no exterior do edifício. A espessura do isolamento térmico da tubagem exterior foi estabelecida de acordo com o Anexo III do RSECE, visto este ser um sistema centralizado comum às várias fracções autónomas do mesmo edifício, e como tal sujeito ao articulado. Também em conformidade, os

valores tabelados de isolamento para os componentes localizados no exterior foram acrescidos de 10 mm.

Com o aumento da concentração do anti-congelante no fluido térmico que é movimentado no circuito primário, a viscosidade do fluido também é agravada, aumentando as perdas de carga relativas ao transporte do fluido na tubagem, o que obriga à utilização de tubagens de maior diâmetro, e consequentemente origina maiores perdas térmicas para o exterior.

Em [6], é sugerido que as perdas de carga lineares nunca ultrapassem os 40 mm.c.a./m., e recomenda-se uma velocidade limite de 1 m/s nas condutas exteriores, designadamente devido ao ruído. Os diâmetros das tubagens foram dimensionados de acordo com estes parâmetros.

Considerou-se que as condutas são em cobre com isolamento térmico. Através da consulta de catálogos com descrição de condutas normalizadas em cobre, admitiu-se que a espessura da conduta do circuito primário é de 1 mm para as condutas com $\Phi 35$ ou inferior, e 2 mm para diâmetros superiores.

Na Tabela 15 e Tabela 16 são representados os valores resumo utilizados para o dimensionamento da instalação.

Tabela 15: Propriedades hidráulicas da instalação com colectores planos selectivos

Área colectora [m ²]	Caudal do fluido [m ³ /s]	Diâmetro interno da tubagem [m]	Velocidade do fluido [m/s]	Perda de carga [mm.c.a/m]	Espessura isolamento [mm]
32	0,3947.10-3	0,026	0,74335	36,473	30
40	0,4933.10-3	0,033	0,57680	17,368	30
48	0,5920.10-3	0,033	0,69216	23,895	30
56	0,6907.10-3	0,038	0,60899	16,012	40
64	0,7893.10-3	0,038	0,69599	20,227	40

Tabela 16: Propriedades hidráulicas da instalação com colectores de tubos de vácuo

Área colectora [m ²]	Caudal do fluido [m ³ /s]	Diâmetro interno da tubagem [m]	Velocidade do fluido [m/s]	Perda de carga [mm.c.a/m]	Espessura isolamento [mm]
32	0,1378.10-3	0,020	0,43856	20,108	30
40	0,1722.10-3	0,020	0,54820	29,714	30
48	0,2067.10-3	0,023	0,49742	21,048	30
56	0,2411.10-3	0,023	0,58033	27,565	30
64	0,2756.10-3	0,023	0,66323	34,822	30

3.4 Programas de simulação utilizados

Os programas de simulação utilizados neste estudo foram o Solterm 5, para fazer a análise energética dos sistemas solares térmicos, e o TRNSYS 16, para fazer a simulação térmica dinâmica do edifício multifamiliar.

3.4.1 Solterm 5 – descrição do software

O Solterm 5 é um programa de análise de desempenho de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, elaborado pelo INETI, e especialmente ajustado para as condições climáticas e técnicas de Portugal. É o software a ser utilizado na contabilização de sistemas solares para o balanço energético de edifícios, no contexto do Sistema de Certificação de Edifícios, Decretos-Lei 78, 79 e 80/2006, de 4 de Abril, com o qual a versão 5 foi especificamente compatibilizada.

A análise de desempenho de um sistema solar é realizada via simulação energética sob condições quasi-estacionárias: isto é, são simulados os balanços energéticos no sistema em intervalos curtos (10 minutos), durante os quais se considera constante o estado do ambiente e o do sistema.

Nestas simulações são usadas informações sobre:

- configuração/dimensionamento do sistema
- estratégias de controlo e operação
- radiação solar horizontal e temperatura ambiente em base horária
- obstruções e sombreamentos
- características técnicas dos componentes (colectores, armazenamento, etc.)
- consumo (ou “carga”) do sistema em base horária média mensal

Estas informações são armazenadas segundo categorias, algumas em bancos de dados que podem ser geridos e expandidos pelos utilizadores. O Solterm inclui já na instalação um conteúdo inicial nestes bancos de dados, em que se salientam os dados meteorológicos – 308 Anos Meteorológicos de Referência, p.e. um por cada Concelho de Portugal – e os dados dos colectores e “kits” de tecnologia solar térmica, que estejam ensaiados e certificados segundo as regras europeias. No entanto, os restantes bancos de dados (depósitos/permutadores, colectores fotovoltaicos, baterias, ...) também já incluem um conteúdo inicial substancial.

A partir dos resultados das simulações de um sistema, é possível obter o seu pré-dimensionamento. Aliás, são fornecidas no programa algumas ferramentas de optimização automática sob vários critérios energéticos. O software disponibiliza também análise económica e uma outra ferramenta útil relativa à componente ambiental, designadamente ao cálculo das emissões de gases com efeito de estufa evitadas pelo uso dos sistemas solares. O programa produz relatórios da climatologia, das análises de desempenho energético e das análises económicas.

Na Figura 27 é representado um exemplo de um sistema simulado com o Solterm.

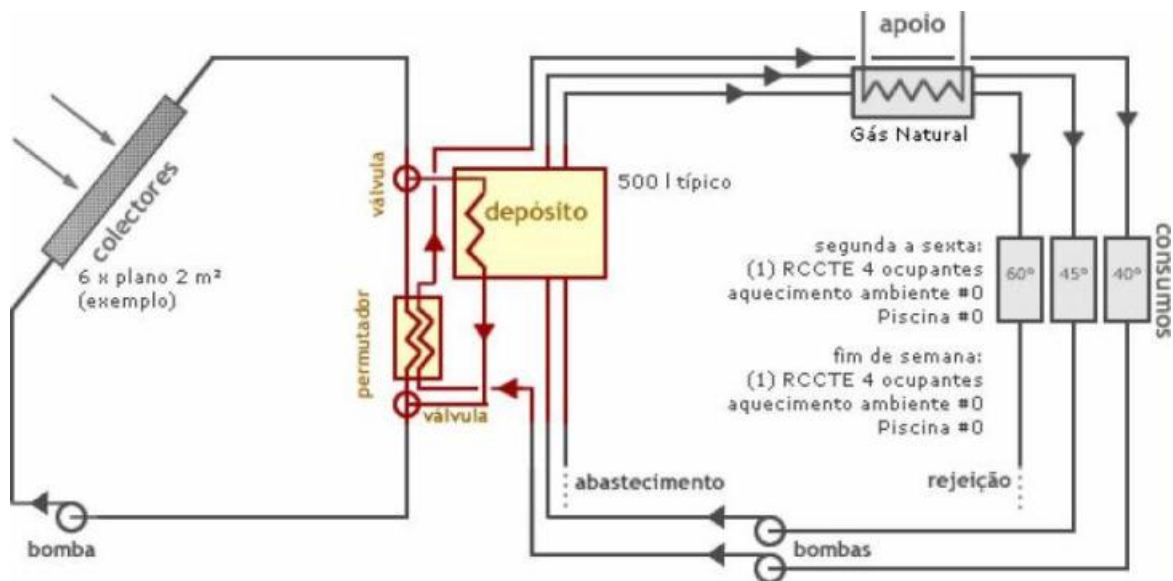


Figura 27: Exemplo de uma configuração utilizada no Solterm - sistema solar térmico para produção de AQS, apoio ao aquecimento ambiente e aumento da temporada de utilização da piscina exterior

3.4.2 TRNSYS 16 – descrição do software

O TRNSYS é um programa com uma estrutura modular e permite simular sistemas em regime transiente, incluindo edifícios multizona. Reconhece uma linguagem de descrição do sistema na qual o utilizador especifica os componentes que constituem o sistema, e o modo como são conectados. A biblioteca do TRNSYS inclui a maioria dos componentes normalmente utilizados em sistemas de energia térmica e eléctrica, assim como rotinas de componentes para processar a entrada de dados meteorológicos ou outras funções dependentes do tempo, e saída de resultados de simulações. A natureza modular do software proporciona imensa flexibilidade, e facilita o acréscimo ao programa de modelos matemáticos não incluídos na biblioteca inicial. O código fonte do kernel assim como os modelos dos componentes estão disponíveis aos utilizadores. Isto simplifica a expansão de modelos já existentes de modo a adaptá-los às necessidades específicas do utilizador.

O TRNSYS está bem adaptado a análises detalhadas de qualquer sistema cujo comportamento depende da passagem do tempo. O programa tornou-se o software de referência para investigadores e engenheiros em todos o mundo, para validar novos conceitos energéticos, desde sistemas simples de água quente sanitária até ao desenvolvimento e simulação de edifícios e o seu equipamento, incluindo estratégias de controlo, comportamento dos ocupantes, etc..

A arquitectura baseada em DLL (“Dynamic Link Library”), permite aos utilizadores adicionar facilmente modelos de componentes novos, usando todas as linguagens de programação mais comuns (C, C++, Pascal, Fortran, etc.). Para além disso, o programa pode ser ligado facilmente a muitas outras aplicações, para pré ou pós-processamento, ou através de chamadas interactivas durante a simulação (p.e. Microsoft Excel, Matlab, Comis, etc.). As

suas maiores aplicações incluem: sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, sistemas AVAC e edifícios com baixo consumo energético incluindo ventilação natural, sistemas de energia renovável, cogeração, células de combustível, etc..

Um projecto em TRNSYS é tipicamente construído através da conexão gráfica de componentes no Simulation Studio, e da definição dos parâmetros globais da simulação. Cada tipo de componente é descrito através de um modelo matemático no motor de simulação do programa. Os componentes do TRNSYS são de uma forma geral referidos como “Types” (p.e. Type 1 refere-se ao coletor solar). O modelo para um edifício multizona é conhecido por Type 56. O Simulation Studio grava a informação do projecto num ficheiro “TRNSYS Project File” (*.tpf). Quando se corre a simulação, o Studio também cria um ficheiro de entrada denominado “deck file” (ficheiro de texto que contém toda a informação referente à simulação mas nenhuma informação gráfica). O Simulation Studio também inclui um gestor de saída no qual se controla quais as variáveis a integrar, a imprimir, e um gestor de erros que permite estudar em detalhe o que se passou durante a simulação. Na Figura 28 observa-se o interface visual do Simulation Studio.

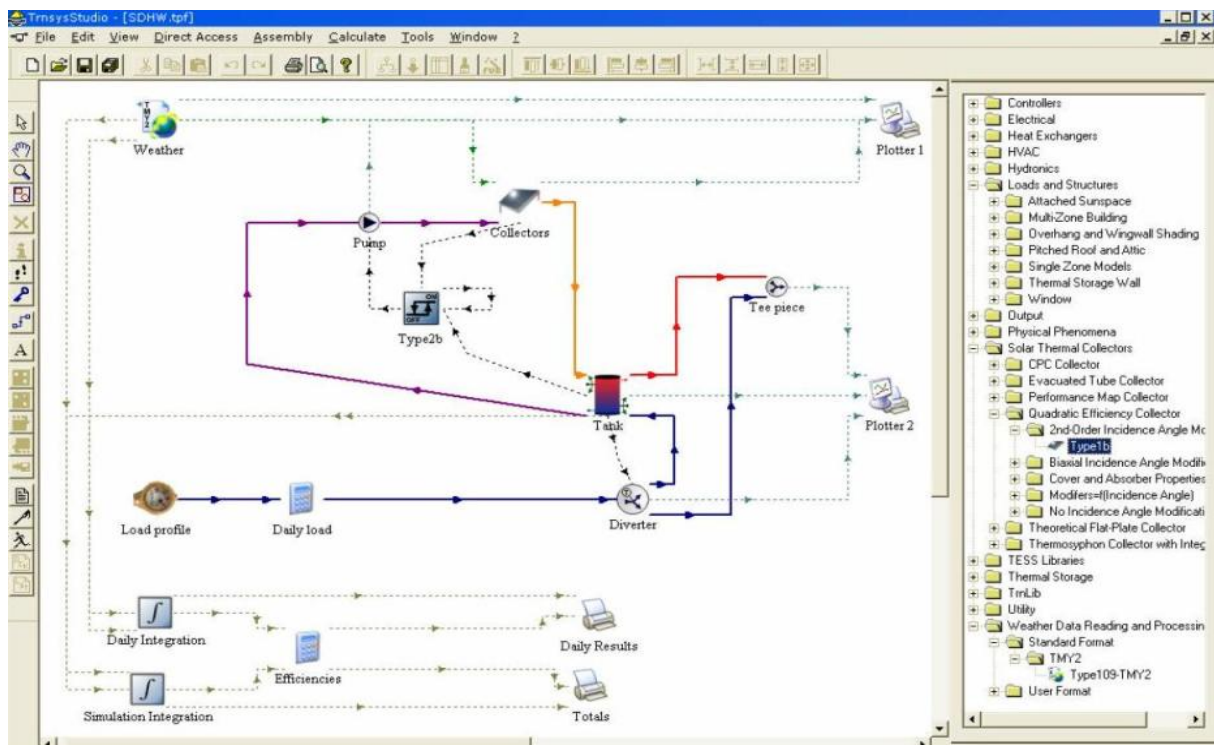


Figura 28: Interface visual do Simulation Studio do TRNSYS

O TRNBuild é a ferramenta utilizada para inserir dados em simulações com edifícios multizona. Permite especificar todos os detalhes da estrutura do edifício, assim como tudo o que é necessário para simular o comportamento térmico do edifício, como propriedades ópticas dos vãos envidraçados, perfis horários de aquecimento e arrefecimento, infiltrações, ventilação mecânica, perfis de ganhos internos, etc.. O TRNBuild cria um ficheiro de descrição do edifício (*.bui) que inclui toda a informação necessária para simular o edifício. Na Figura 29 observa-se o interface gráfico desta ferramenta.

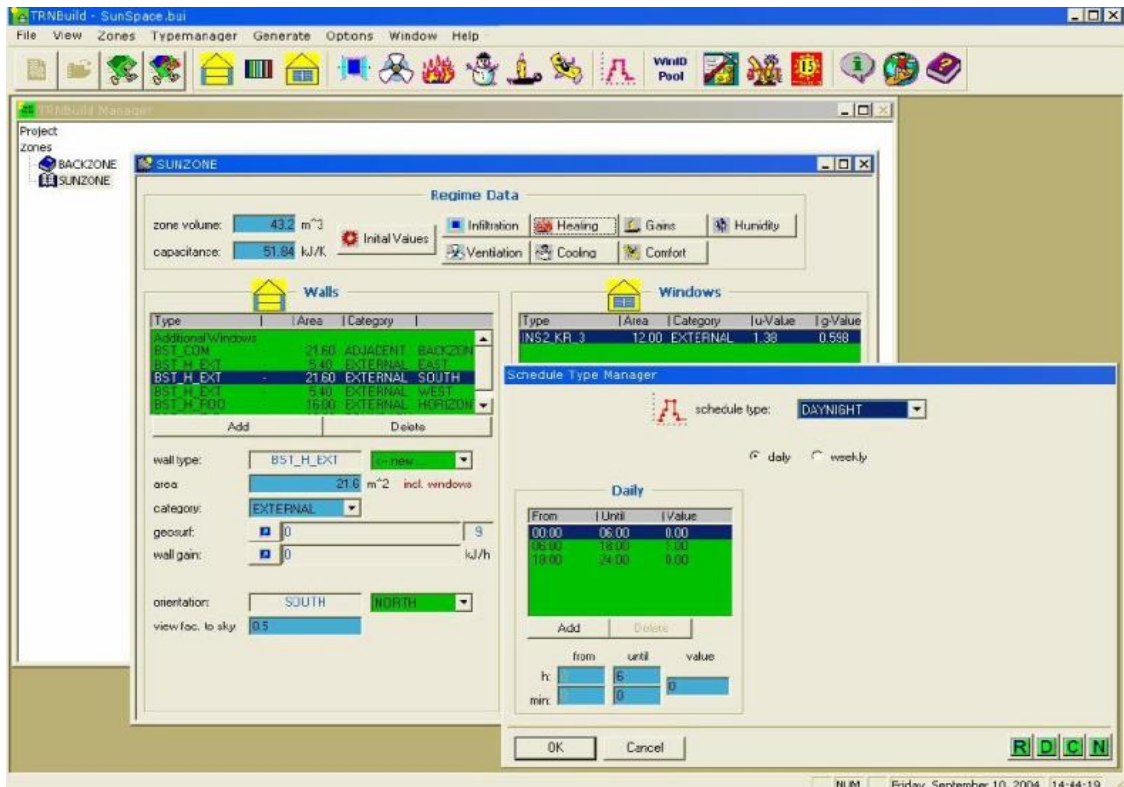


Figura 29: Interface visual do TRNBuild do TRNSYS

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.1 Aplicação do RCCTE à habitação unifamiliar

Na definição da envolvente do edifício unifamiliar foi verificado o cumprimento dos requisitos mínimos de qualidade térmica impostos pelo RCCTE, de acordo com o Anexo IX do articulado, e já referidos anteriormente, nomeadamente no capítulo 1.4.6. As características ópticas, e térmicas, dos vãos envidraçados já foram apresentadas na descrição do edifício correspondente.

Foi calculado o indicador de inércia I_t do edifício, chegando a um valor de 606,7 kg/m² (massa superficial útil por m² da área de pavimento), o que de acordo com o Quadro VII.6 do RCCTE, conclui-se que o edifício tem uma classe de inércia térmica interior “Forte”.

4.1.1 Zonas climáticas estudadas

Na vivenda unifamiliar, o RCCTE foi aplicado considerando a sua localização em vários pontos de Portugal continental. Os critérios de escolha dos Concelhos basearam-se na inclusão dum número considerável de zonas climáticas distintas, de forma a ser o mais representativo do clima português.

A Figura 30 apresenta a localização dos Concelhos escolhidos, e correspondente zona climática em que se inserem, sendo os valores de referência a utilizar para cada município representados nos Anexos A e B.

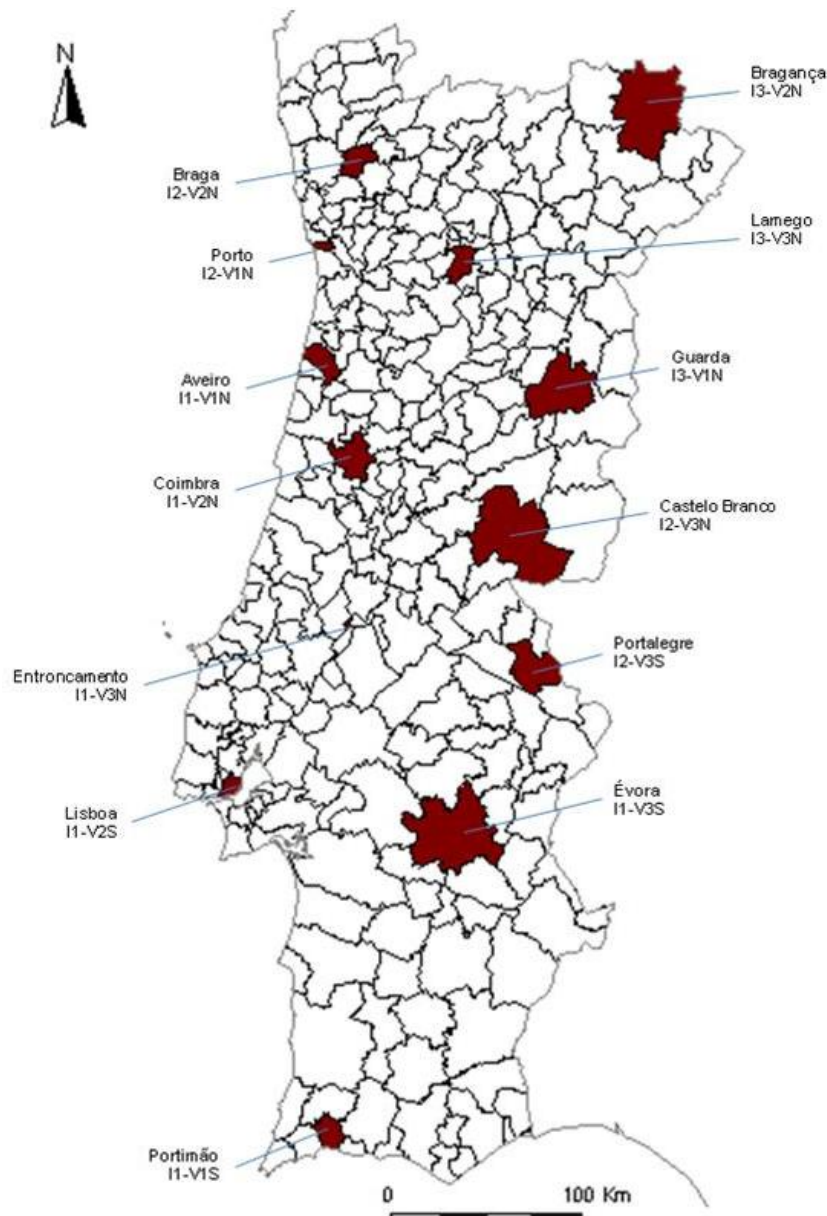


Figura 30: Mapa de Portugal com os Concelhos e zonas climáticas correspondentes, onde foi considerada a localização da habitação unifamiliar para aplicação do RCCTE [1]

4.1.2 Coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ)

As perdas de energia através do elemento que separa o espaço útil do não útil são calculadas em função do coeficiente τ (coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não-aquecidos). O parâmetro τ é característico de um espaço e é igual para todas as fracções autónomas confinantes com ele, resultante, de uma forma simplificada, de um balanço energético ao espaço não útil.

A determinação do valor de τ é feita a partir da Tabela IV.1 do RCCTE, em função do tipo de espaço não-útil e da relação entre as áreas dos elementos que separam os dois espaços e a dos elementos que separam o espaço não-útil do exterior.

O sótão é um espaço não habitado, logo é um espaço não útil. Foi considerado um desvão pouco ventilado. Para este caso, o valor de τ em que a área do elemento que separa o espaço útil do não útil é de 65,20 m², e a área do elemento que separa o não-útil do exterior é de 100,6 m² ($\frac{A_i}{A_u} = \frac{65,20}{100,55} = 0,65$), é de 0,9.

4.1.3 Factor de forma

O factor de forma traduz a área da envolvente face à volumetria da FA. Para o mesmo volume interior, factores de forma mais elevados implicam necessariamente maiores áreas de perda de calor exigindo portanto, para um mesmo clima, mais dispêndio de energia para aquecimento. Desta forma, de acordo com o Artigo 15.º do RCCTE, o factor de forma de uma habitação influencia directamente o valor limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento (N_t).

O factor de forma (FF) da vivenda é calculado de acordo com a seguinte expressão presente no Anexo II do RCCTE:

$$FF = \frac{(\sum A_{ext}) + \sum_i (\tau A_{int})_i}{V} = 0,678 \quad (17)$$

4.1.4 Coeficientes de transmissão térmica linear

Uma ponte térmica é toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à zona corrente, devido à existência de materiais de diferente condutibilidade térmica e(ou) a uma modificação na geometria da envolvente.

Para o caso das pontes térmicas lineares (PTL), o RCCTE apresenta, para as situações mais correntes, os valores dos coeficientes de transmissão térmica linear Ψ . Na Tabela 17, são representados os Ψ 's do edifício unifamiliar.

Tabela 17: Coeficientes de transmissão térmica linear no edifício unifamiliar

Configurações	Ψ [W/m.°C]	Referência
Laje de pavimento em contacto com o solo; $Z = 0,0$ m e $R_{\text{isolante}} = 0,54$ m ² .°C/W	1,20	RCCTE, Tabela não colocada devido a lapso editorial
Ligações entre:		
Fachada com cobertura inclinada – PTL interior $c/\tau = 0,9$; $e_p = 0,25$ m	0,70	RCCTE, Tabela IV.3 – Dr.
Fachada com os pavimentos térreos; $e_p = 0,18$ m	0,48	RCCTE, Tabela IV.3 – Ar
Fachada com pavimentos intermédios; $e_p = 0,20$ m ; $e_m = 0,35$ m	0,20	RCCTE, Tabela IV.3 – Cr
Duas paredes verticais; $e_m = 0,35$ m	0,20	RCCTE, Tabela IV.3 – Fr

4.1.5 Taxa de renovação de ar horária nominal

Visto na cozinha existir extracção por exaustor, e dado que este só funciona, normalmente, durante períodos curtos, segundo o RCCTE, o edifício é ventilado naturalmente. A taxa de renovação de ar horária nominal [R_{ph}] é determinada de acordo com o Quadro IV.1 do RCCTE, em função da tipologia do edifício, da sua exposição do vento e da permeabilidade ao ar da sua envolvente.

Através da consulta do Quadro IV.2 do RCCTE, verifica-se que a classe de exposição ao vento das fachadas do edifício é 1, independentemente das várias localizações onde o edifício será estudado. Não existem aberturas auto-reguladas nas fachadas, e as caixilharias possuem classe 1. A proporção de área de envidraçados relativamente à área útil de pavimento é de 9,68% e a porta exterior não está bem vedada. 12,2 m² de área de envidraçados possui caixa de estore, e a restante 0,64 m² não.

Assim, do exposto advém que o R_{ph} do edifício é de 0,945 h⁻¹.

4.1.6 Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento

De acordo com as metodologias descritas no Anexo IV do RCCTE para o cálculo das necessidades de aquecimento, e Anexo V do RCCTE para o cálculo das necessidades de arrefecimento, é indicado na Tabela 18, juntamente com os valores limites das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento (n.º1 do Artigo 17º do RCCTE), os valores de N_{ic} e N_{vc} da FA, para as várias localizações estudadas.

Tabela 18: Necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento e limites correspondentes, para o edifício unifamiliar, nas várias localizações estudadas

Zona climática	Concelho	N_{ic} [kWh/m².ano]	N_i [kWh/m².ano]	N_{vc} [kWh/m².ano]	N_v [kWh/m².ano]
I1 V1N	Aveiro	65,6	68,5	1,0	16
I1 V1S	Portimão	38,4	47,8	3,0	22
I1 V2N	Coimbra	70,3	71,8	1,1	18
I1 V2S	Lisboa	55,3	59,3	9,5	32
I1 V3N	Entroncamento	71,0	72,2	5,6	26
I1 V3S	Évora	67,0	68,5	9,6	32
I2 V1N	Porto	73,7	78,7	1,0	16
I2 V2N	Braga	84,6	87,4	1,2	18
I2 V3N	Castelo Branco	76,3	80,5	5,7	26
I2 V3S	Portalegre	82,1	84,7	9,5	32
I3 V1N	Guarda	112,0	119,7	1,1	16
I3 V2N	Bragança	132,8	135,8	1,3	18
I3 V3N	Lamego	111,5	113,2	5,7	26

4.1.7 Necessidades energéticas para produção de AQS

No cálculo das necessidades anuais específicas para produção de AQS, foi contabilizada através de simulação energética a energia anual efectivamente disponibilizada pelo solar térmico para AQS. De acordo com a metodologia descrita no capítulo 1.4.4, foi calculado o N_{ac} nas várias localizações definidas, e para os quatro casos em estudo, consoante o tipo de sistema solar:

- com circulação natural (kit termossifão) (SKT)
- com circulação forçada:
 - colectores solares planos selectivos (SPS)
 - colectores solares de tubos de vácuo (STV)
 - colectores solares CPC (SCPC)

O valor de referência para o consumo de AQS (N_a) é de 35,68 kWh/m².ano. Os resultados das necessidades térmicas de AQS (N_{ac}) para os diferentes sistemas de colectores solares encontram-se na Figura 31.

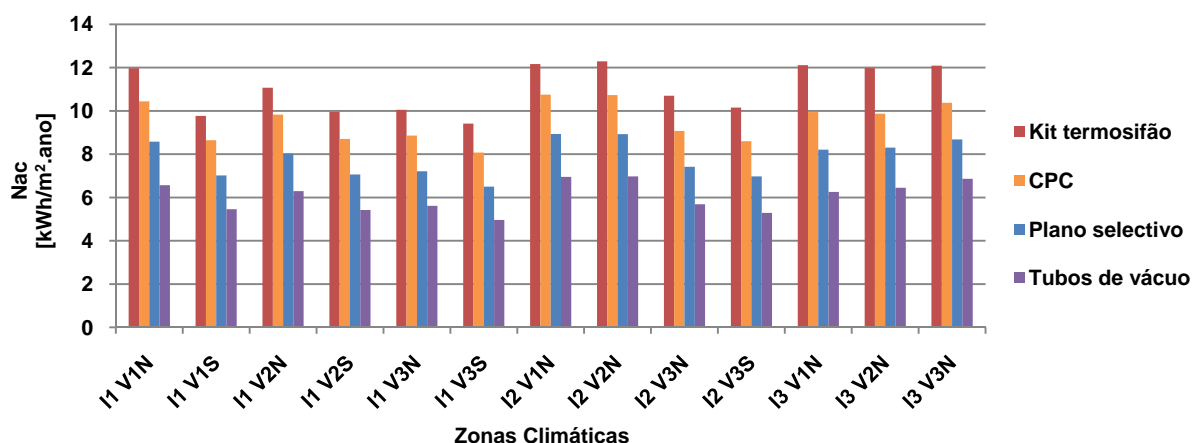


Figura 31: N_{ac} para os 4 tipos de sistemas de colectores solares

Como expectável, os colectores STV apresentam os menores consumos energéticos relativos ao sistema de apoio à produção de AQS, contrastando com o sistema SKT. Em relação às localizações estudadas, a zona climática I1V3S (Concelho de Évora) é a que apresenta os menores consumos energéticos, sendo que a zona I2V2N (Concelho de Braga) apresenta os maiores.

Um outro aspecto importante é a quantidade de energia desperdiçada, ou seja energia captada e não utilizada pelo sistema. Como expectável, o sistema STV é mais sensível a este fenómeno, tal como se apresenta na Figura 32.

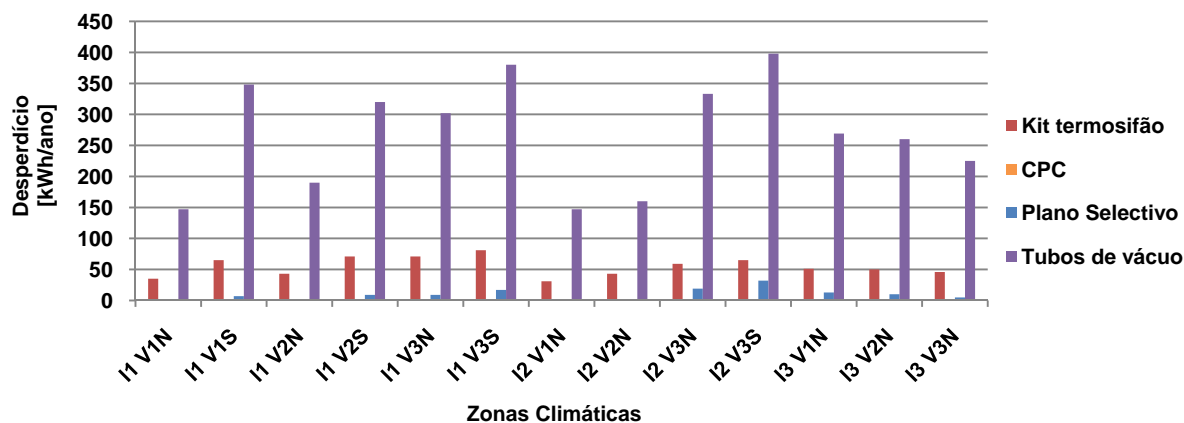


Figura 32: Energia solar desperdiçada nos 4 sistemas estudados

É na zona climática de Verão V3S que ocorrem os maiores desperdícios energéticos solares.

4.1.8 Necessidades globais de energia primária

De acordo com a metodologia descrita no capítulo 1.4.5, foram calculadas as energias primárias totais (N_{tc}) e as de referência (N_t) para o edifício, para várias localizações definidas, e para os quatro casos em estudo. Na análise comparativa de N_{tc}/N_t para os exemplos apresentados, as quatro soluções propostas seguem um andamento expectável face ao já apresentado (

Figura 33).

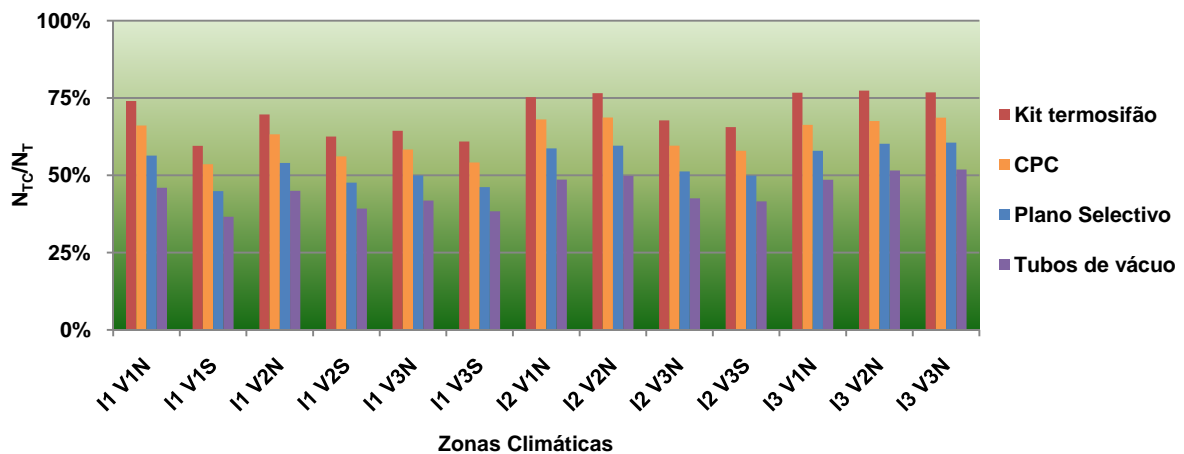


Figura 33: N_{tc}/N_t para os 4 tipos de instalação solar térmica em habitação unifamiliar

4.1.9 Classificação energética

A análise anterior permitiu efectuar um estudo da classificação energética para cada caso de estudo. Na Figura 34 é representado um comparativo entre proporções de classes energéticas atribuídas, para os quatro casos em estudo. Avaliando detalhadamente cada uma das soluções e resultados obtidos é possível avaliar as classes energéticas que cada uma das quatro soluções pode representar para o edifício.

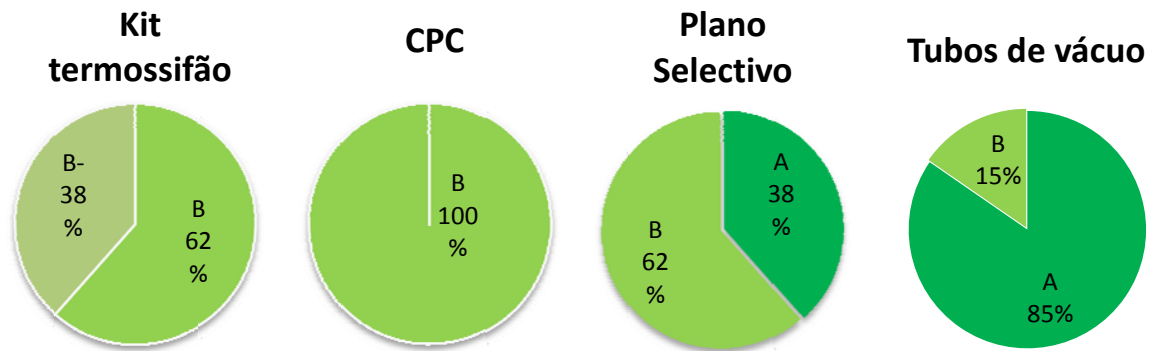


Figura 34: Classes energéticas atribuídas nos 4 tipos de instalação solar térmica em habitação unifamiliar

Neste exemplo é notório o efeito que o sistema com maior captação de energia conduz o edifício a uma maior classificação. Por outro lado, talvez mais interessante, o sistema com colectores planos selectivos apresenta-se com um excelente compromisso energia captada/energia desperdiçada.

Tendo em consideração as análises efectuadas poder-se-á afirmar, do ponto de vista energético, que de todos os sistemas, os SPS apresentam-se como os mais atractivos.

4.2 Aplicação do RCCTE à habitação multifamiliar

Na definição da envolvente do edifício multifamiliar, foi verificado o cumprimento dos requisitos mínimos de qualidade térmica impostos pelo RCCTE, de acordo com o Anexo IX do articulado, e já referidos anteriormente, nomeadamente no capítulo 1.4.6.

O edifício é constituído por oito fracções autónomas com rigorosamente as mesmas características geométricas, somente diferindo no facto de quatro estarem localizadas na zona este do edifício, e as restantes na zona oeste. Foi calculado o indicador de inércia I_t , que é igual para todas as fracções autónomas, chegando a um valor de $587,1 \text{ kg/m}^2$ (massa superficial útil por m^2 da área de pavimento). De acordo com o Quadro VII.6 do RCCTE, o edifício tem uma classe de inércia térmica interior “Forte”.

4.2.1 Localizações estudadas e radiação solar disponível

No edifício multifamiliar as localizações estudadas foram seleccionadas de acordo com um critério semelhante ao usado no edifício unifamiliar, mas aqui seleccionaram-se menos Concelhos, de forma a reduzir o tempo necessário às simulações dos sistemas solares e, também, devido à menor disponibilidade de dados meteorológicos relativos a Portugal por parte do software de simulação dinâmica utilizado. A localização e indicação dos concelhos é representada na Figura 35 e Tabela 19.

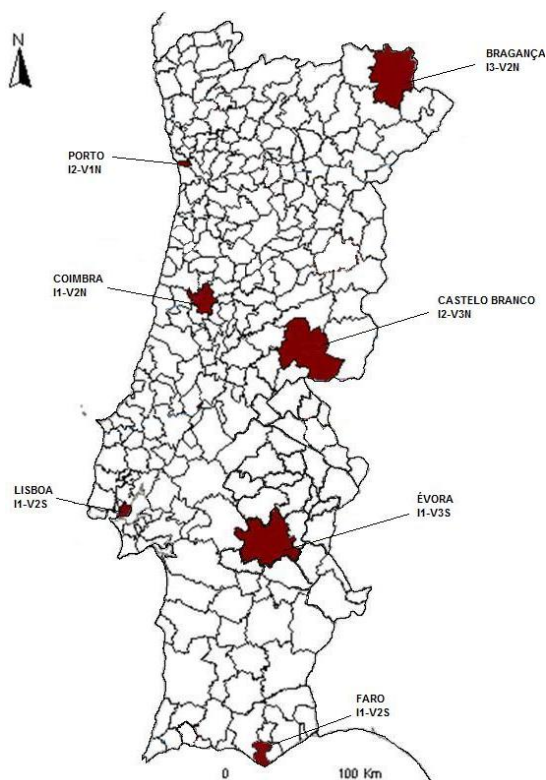


Tabela 19: Zonas climática da habitação multifamiliar

Concelhos	Zona climática
Coimbra	I1 – V2N
Lisboa	I1 – V2S
Faro	I1 – V2S
Évora	I1 – V3S
Porto	I2 – V1N
Castelo Branco	I2 – V3N
Bragança	I3 – V2N

Figura 35: Localização dos Concelhos para análise da habitação multifamiliar

Na Figura 36 é representada a variação mensal da irradiação solar horizontal nos Concelhos onde será considerada a localização do edifício multifamiliar para aplicação do RCCTE, simulação dinâmica multizona com o TRNSYS, e simulação do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização ambiente com o Solterm.

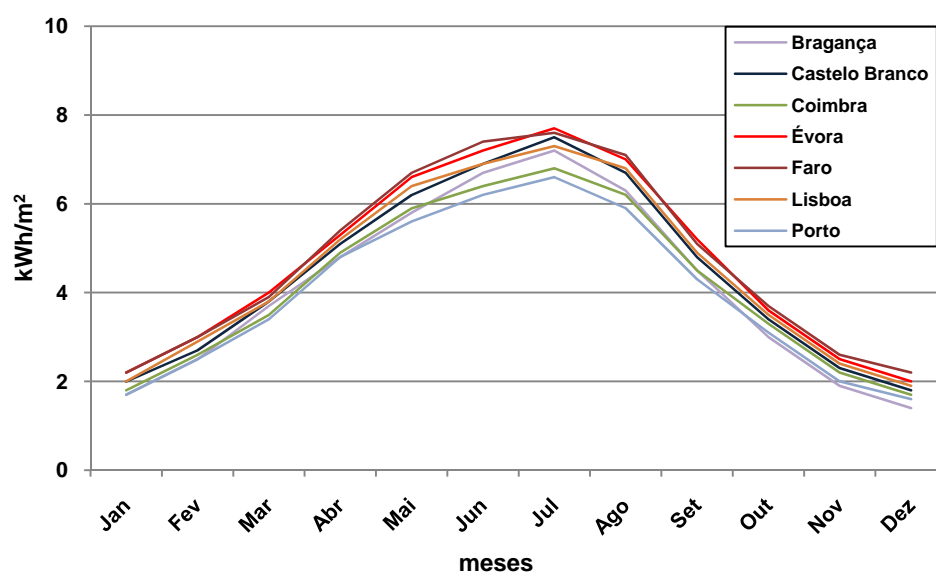


Figura 36: Variação mensal da irradiação solar diária horizontal

4.2.2 Coeficiente de redução das perdas térmicas para locais não aquecidos (τ)

Da mesma forma como realizado para a habitação unifamiliar foram calculados os valores de τ . O vão de escadas do edifício é um espaço não útil, e foi considerado circulação comum sem abertura directa para o exterior. Neste caso, o valor de τ em que a área do elemento que separa o espaço útil (fracção autónoma) do não útil é de 21,6 m², e a área do elemento que separa o não-útil do exterior é de 61,9 m² ($\frac{A_i}{A_u} = \frac{21,63}{61,88} = 0,35$), é de 0,6.

No caso da garagem colectiva que afecta termicamente as fracções autónomas localizadas no rés-do-chão, o valor de τ em que a área do elemento que separa o espaço útil (fracção autónoma) do não útil é de 85,2 m², e a área do elemento que separa o não-útil do exterior é de 126,8 m² ($\frac{A_i}{A_u} = \frac{85,16}{126,78} = 0,67$), é de 0,9.

4.2.3 Factor de forma

Da mesma forma como para o caso da habitação unifamiliar, calculou-se o factor de forma de cada uma das fracções autónomas, obtendo-se os valores apresentados na

Tabela 20. Note-se que no edifício em estudo, o FF é igual para as duas fracções autónomas pertencentes ao mesmo piso.

Tabela 20: Factor de forma para cada um dos pisos do edificio multifamiliar

Piso	FF
3º piso	0,802
2º piso	0,402
1º piso	0,402
Rés-do-chão	0,762

4.2.4 Coeficientes de transmissão térmica linear

O procedimento é em tudo igual à habitação unifamiliar, e os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Coeficientes de transmissão térmica linear [Ψ] no edifício multifamiliar

Configurações	Ψ [W/m.°C]	Referência
Ligações entre:		
Fachada com cobertura em terraço; $e_p = 0,35$ m ; $e_m = 0,35$ m	0,75	RCCTE, Tabela IV.3 – Dr
Fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos; $e_p = 0,35$ m ; $e_m = 0,35$	0,70	RCCTE, Tabela IV.3 - Br
Fachada com pavimentos intermédios; $e_p = 0,35$ m ; $e_m = 0,35$ m	0,30	RCCTE, Tabela IV.3 - Cr
Duas paredes verticais; $e_m = 0,35$ m	0,20	RCCTE, Tabela IV.3 - Fr

4.2.5 Taxa de renovação de ar horária nominal

De acordo com os mesmos critérios seguidos para o edifício unifamiliar, de acordo com o RCCTE, o edifício multifamiliar é ventilado naturalmente.

Através da consulta do Quadro IV.2 do RCCTE, e para as sete localizações estudadas, verifica-se que a classe de exposição ao vento das fachadas do edifício é sempre 1, excepto quando se considera o edifício localizado no Porto (região B – edifício situado numa faixa de 5 km de largura junto à costa) e somente para as fracções autónomas do 3º piso, em que a altura acima do solo do ponto médio das fachadas é de 11,1 m (≥ 10 m), a classe de exposição é 2. Não existem aberturas auto-reguladas nas fachadas, e as caixilharias não têm classe atribuída. A proporção de área de envidraçados relativamente à área útil de pavimento é de 9,86% e a porta exterior não está bem vedada. Toda a área de envidraçados (8,4 m²) possui caixa de estore.

Assim, do exposto advém que o R_{ph} do edifício é de 1,0 h⁻¹, e 1,05 h⁻¹ para a excepção acima referida.

4.2.6 Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento

Da mesma forma como realizado para o edifício unifamiliar, procedeu-se ao cálculo dos valores das necessidades de aquecimento e arrefecimento, e valores de referência, para as várias localizações em estudo, e em todas as fracções autónomas constituintes do edifício multifamiliar. Note-se que os valores das fracções autónomas pertencentes ao mesmo piso, são iguais, como tal não se apresentam na Tabela 22.

Tabela 22: Necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento, e valores de referência correspondentes, para o edifício multifamiliar

Concelho	Zona climática	Piso FA	N _{ic} [kWh/m ² .ano]	N _i [kWh/m ² .ano]	N _{ve} [kWh/m ² .ano]	N _v [kWh/m ² .ano]
Coimbra	II V2N	3°	69,79	78,47	1,53	18
		2°	43,65	62,17	0,93	18
		1°	45,85	62,17	0,93	18
		R/C	73,45	76,31	0,93	18
Lisboa	II V2S	3°	54,75	64,79	12,48	32
		2°	33,65	51,51	8,15	32
		1°	35,55	51,51	8,15	32
		R/C	58,09	63,03	8,15	32
Faro	II V2S	3°	52,04	58,21	12,27	32
		2°	31,96	46,37	8,15	32
		1°	33,54	46,37	8,15	32
		R/C	53,57	56,64	8,15	32
Évora	II V3S	3°	66,51	74,92	12,68	32
		2°	41,62	59,41	8,35	32
		1°	43,70	59,41	8,35	32
		R/C	69,98	72,87	8,35	32
Porto	I2 V1N	3°	74,32	86,07	1,20	16
		2°	47,46	68,10	0,88	16
		1°	49,57	68,10	0,88	16
		R/C	79,78	83,69	0,88	16
Castelo Branco	I2 V3N	3°	75,31	88,10	7,22	26
		2°	49,39	69,68	4,87	26
		1°	51,51	69,68	4,87	26
		R/C	82,45	85,66	4,87	26
Bragança	I3 V2N	3°	136,47	148,90	1,40	18
		2°	99,36	117,08	0,99	18
		1°	101,91	117,08	0,99	18
		R/C	144,31	144,68	0,99	18

4.2.7 Necessidades energéticas para produção de AQS

No caso da habitação multifamiliar há seis análises consoante a opção na instalação do sistema solar que difere na área instalada e no tipo de colector.

Nesta fase, será realizada uma avaliação da influência, em termos de desempenho energético, do espaço disponível para a instalação de colectores solares térmicos na cobertura do edifício, para as diferentes análises. Os vários parâmetros necessários ao procedimento de cálculo já foram descritos no capítulo 3.3.2, incluindo a definição das 6 análises a realizar. A título de exemplo apresenta-se a localização no Concelho do Porto.

Na Figura 37 observa-se a variação de N_{ac} em cada FA do edifício multifamiliar, variando o número de pisos do edifício, e para as 6 análises já definidas no caso de estudo correspondente. Note-se que independentemente do número de pisos do edifício, como já verificado, a área máxima de instalação de colectores solares é de 64 m², estando em análise a contribuição desse sistema para o aumento da eficiência para as diferentes FA's.

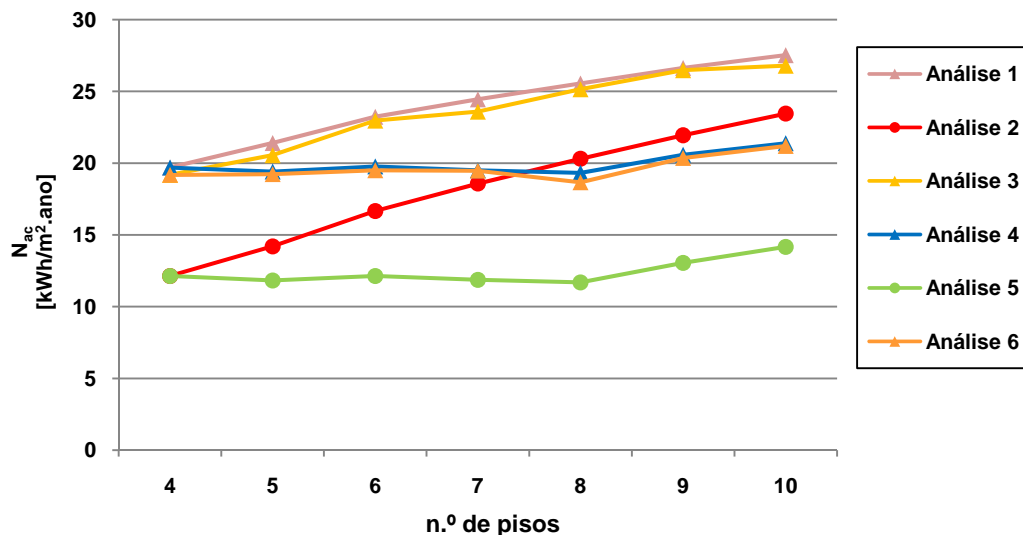


Figura 37: N_{ac} em função do número de pisos em cada FA do edifício multifamiliar

No que respeita às necessidades efectivas de AQS o que se verifica é o expectável, ou seja a solução 5 é a que apresenta menor consumo, independentemente do número de pisos. Por outro lado a solução 1 apresenta o pior desempenho. De uma forma geral o andamento das várias soluções era expectável quando a área está limitada e as necessidades crescem com o número de pisos.

4.2.8 Necessidades globais de energia primária

Com a variação do número de pisos do edifício e consequente aumento do número de fracções autónomas e altura do edifício, para além do valor de N_{ac} , as necessidades energéticas de climatização das fracções autónomas também sofrem variações. Estas resultam devido à variação do sombreamento do horizonte F_h , e pela eventual variação da classe de exposição ao vento das fachadas dos pisos superiores.

O factor de sombreamento do horizonte F_h reflecte o efeito do sombreamento de obstruções longínquas exteriores ao edifício ou criadas por outros edifícios vizinhos, e depende do ângulo do horizonte, latitude, orientação, clima local e da duração da estação de

aquecimento. É uma variável que influencia directamente os ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados de cada fachada, em cada FA.

Em ambiente urbano, e considerando o desconhecimento da informação necessária ao cálculo do ângulo de horizonte, o RCCTE impõe que se adopte um ângulo de horizonte de 45° de acordo com o Artigo 59.º do RGEU, Regime Geral das Edificações Urbanas, a seguir transcrito:

“A altura de qualquer edificação será fixada de forma que em todos os planos verticais perpendiculares à fachada nenhum dos seus elementos com excepção de chaminés e acessórios decorativos, ultrapasse o limite definido pela linha recta a 45°, traçada em cada um desses planos a partir do alinhamento da edificação fronteira, definido pela intersecção do seu plano com o terreno exterior.” [26]

Assim sendo, na Tabela 23 apresenta-se a variação do F_h em cada um dos pisos, variando a quantidade total de pisos do edifício. O “h” representa a altura do edifício, e o “m” representa a altura acima do solo do ponto médio dos vãos envidraçados de cada piso.

Tabela 23: Variação do F_h em cada piso, variando o número total de pisos do edifício multifamiliar

F_h	4 pisos h=12,40m	5 pisos h=15,25m	6 pisos h=18,10m	7 pisos h=20,95m	8 pisos h=23,80m	9 pisos h=26,65m	10 pisos h=29,50m
h=0m	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
R/C m=2,50m	38,6°	39,9°	40,8°	41,4°	41,8°	42,2°	42,5°
1º andar m=5,35 m	29,6°	33,0°	35,2°	36,7°	37,8°	38,6°	39,3°
2º andar m=8,20 m	18,7°	24,8°	28,7°	31,3°	33,2°	34,7°	35,8°
3º andar m=11,05 m	6,2°	15,4°	21,3°	25,3°	28,2°	30,3°	32,0°
4º andar m=13,90 m		5,1°	13,1°	18,6°	22,6°	25,6°	27,9°
5º andar m=16,75 m			4,3°	11,3°	16,5°	20,4°	23,4°
6º andar m=19,60 m				3,7°	10,0°	14,8°	18,6°
7º andar m=22,45 m					3,2°	9,0°	13,4°
8º andar m=25,30 m						2,9°	8,1°
9º andar m=28,15 m							2,6°

A classe de exposição ao vento das fachadas das diferentes fracções autónomas do edifício, varia consoante a altura acima do solo do ponto médio do(s) correspondente vão(s) envidraçado(s). De acordo com o definido no Quadro IV.2 do RCCTE, verifica-se que maiores alturas podem aumentar o grau de exposição da fachada, e no Quadro IV.1 observa-se a sua influência na taxa de renovação horária nominal da FA. No Concelho do Porto, visto

ter sido considerado a localização do edifício numa região B, a classe de exposição varia de acordo com o representado na Tabela 24.

Tabela 24: Classes de exposição ao vento das fachadas das FA's do edifício multifamiliar

Altura acima do solo – “m”	Classe de exposição
< 10 m	1
[10;18[m	2
[18;28[m	2
≥ 28 m	3

A Figura 38 apresenta a variação do indicador energético das necessidades globais de energia primária, variando o número de pisos do edifício, e para as 6 análises. Optou-se por escolher uma FA localizada no último piso, devido ao facto de ser uma localização crítica em termos de classe de exposição ao vento, e dada a penalização na taxa de renovação horária nominal.

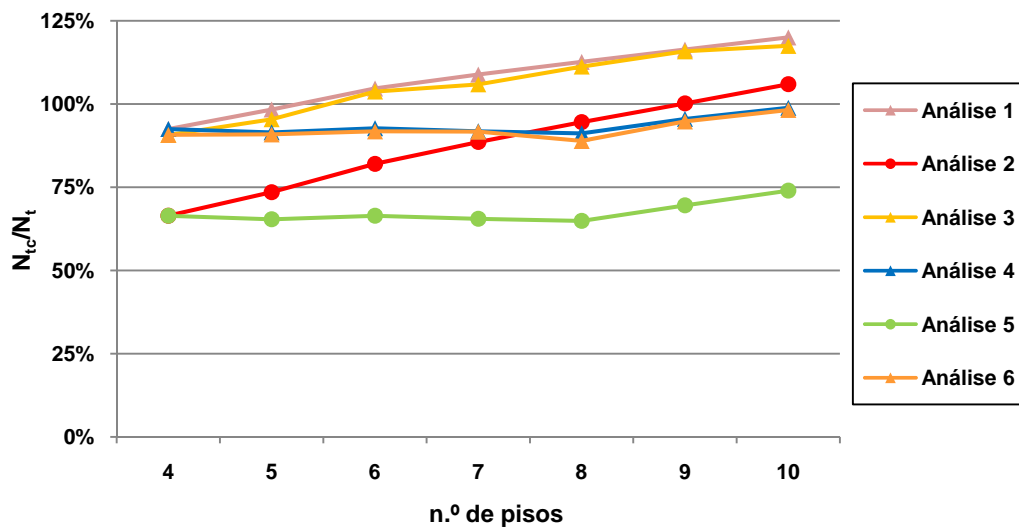


Figura 38: N_{tc}/N_t para as FA's do último piso do edifício multifamiliar

O andamento das necessidades de energia primária é o expectável, face ao já apresentado. Salienta-se, ainda, que com o crescer do número de pisos, na solução 1, 2 e 3 observa-se que a FA é não regulamentar ($N_{tc} > N_t$), contribuindo para isso a limitação da instalação a 50% da área de cobertura disponível, nas três soluções referidas.

4.3 Simulação dinâmica multizona do edifício multifamiliar

Para simular o sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização do edifício multifamiliar foi necessário efectuar uma simulação dinâmica do edifício na sua totalidade, de forma a adquirir as necessidades de aquecimento e arrefecimento dos oito apartamentos, numa base horária, 24 horas por dia, 365 dias por ano. Esses valores foram posteriormente exportados para o software de análise energética de sistemas solares, obtendo-se desta forma uma resposta rigorosa do solar térmico às solicitações dinâmicas climáticas do edifício.

A base de dados climáticos integrada na simulação com o TRNSYS foi a do Meteoronorm 5. Esta opção baseou-se em [16], onde relativamente à base de dados climáticos do EnergyPlus, é considerado que os dados provenientes do Meteoronorm dão origem a valores mais próximos da informação disponível no RCCTE.

Na simulação multizona do edifício, os oito apartamentos e os dois espaços não úteis foram considerados zonas individuais, admitindo-se que o vão de escadas e a garagem colectiva não são climatizados, e que os apartamentos possuem equipamentos de climatização de potência ilimitada e são mantidos permanentemente às condições de referência estipuladas pelo RCCTE, nomeadamente uma temperatura de ar de 20°C para a estação de aquecimento e 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento.

As características introduzidas no TRNBuild são as presentes na descrição do edifício correspondente e foram iguais às utilizadas na aplicação do RCCTE, salvo as seguintes considerações:

- Os ganhos internos de cada um dos apartamentos (4 W/m^2) foram divididos equitativamente numa componente radiativa, e noutra convectiva.
- Devido à necessidade de também modelar os espaços não úteis, considerou-se um valor de infiltrações de $0,5 \text{ h}^{-1}$ para o vão de escadas, e 2 h^{-1} para a garagem colectiva.

Na Figura 39 observa-se a configuração efectuada no painel do Simulation Studio. Os dados de entrada e saída do bloco “Building” (Type 56) estão representados no Anexo C tendo sido transcritos do ficheiro *.inf criado pelo TRNBuild. Foram inseridos 11 blocos “Type 28”, que integram os valores de entrada ao longo do tempo desenvolvendo operações aritméticas nos integrais, e posteriormente “imprimem” os resultados. Um dos blocos refere-se às necessidades totais de climatização dos oito apartamentos, e os restantes às necessidades de climatização e temperatura do ar de cada um dos espaços definidos.

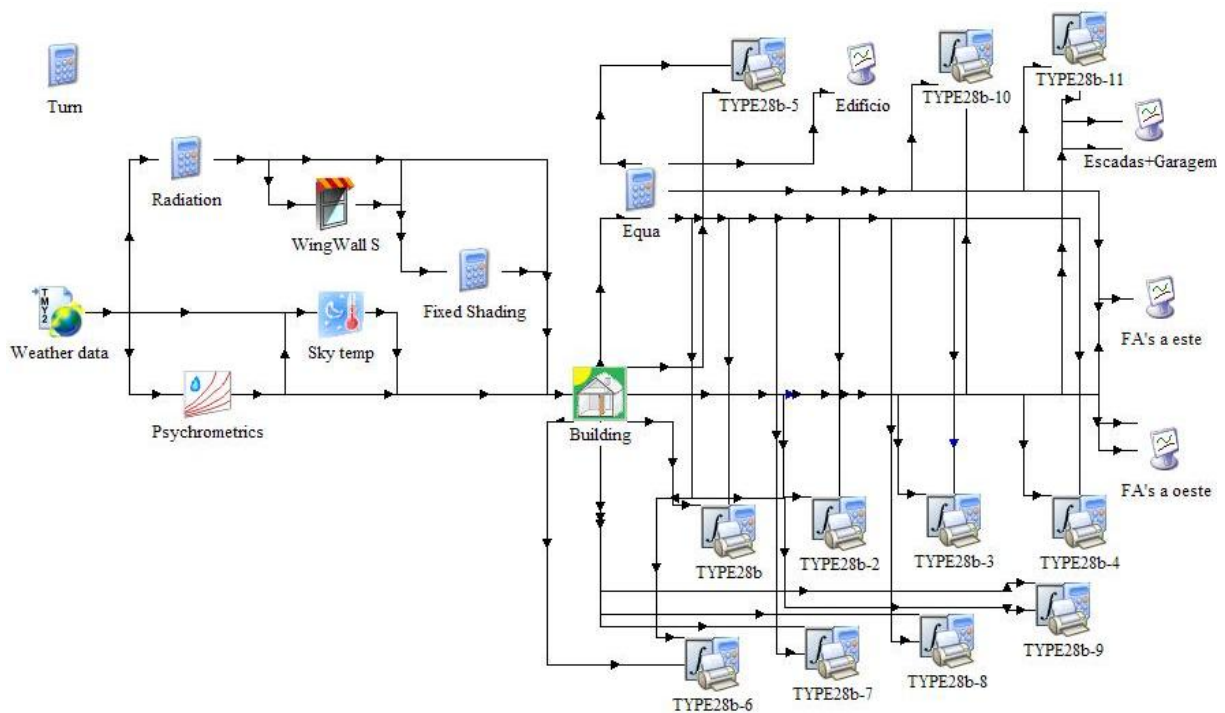


Figura 39: Esquema de simulação com o TRNSYS, do edifício multifamiliar

4.3.1 Resultados das simulações com o TRNSYS

Nas figuras resultantes das simulações efectuadas, “HEAT” refere-se às necessidades de aquecimento, e “COOL” refere-se às necessidades de arrefecimento.

No Anexo D, é representado o comportamento térmico do edifício em regime de “free float” ao longo do ano, nomeadamente a variação das temperaturas no interior dos apartamentos em cada um dos pisos, para cada localização estudada, assumindo que os equipamentos de climatização estão desligados o ano todo.

Na Figura 40, é representada a variação ao longo do ano, das necessidades energéticas para climatização dos apartamentos de cada um dos pisos do edifício multifamiliar, no Concelho de Castelo Branco. No Anexo E apresenta-se a mesma análise para as restantes localizações estudadas.

As necessidades energéticas instantâneas de climatização do edifício e que serão utilizadas na simulação do sistema solar térmico, estão representadas na Figura 41 observando-se a sua variação ao longo do ano, no Concelho de Castelo Branco. No Anexo F apresenta-se a mesma análise para as restantes localizações estudadas. Recorde-se que a envolvente do edifício é alterada conforme a zona climática de Inverno onde o edifício está localizado.

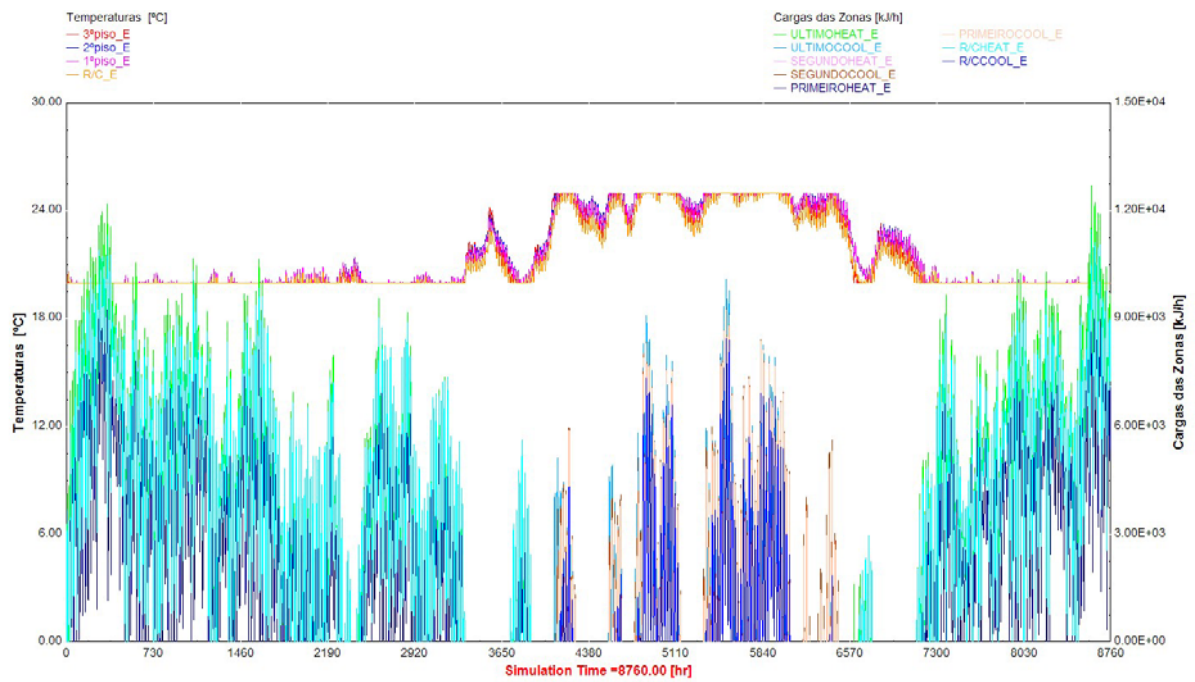


Figura 40: Necessidades energéticas de climatização das FA's do edifício multifamiliar, em Castelo Branco

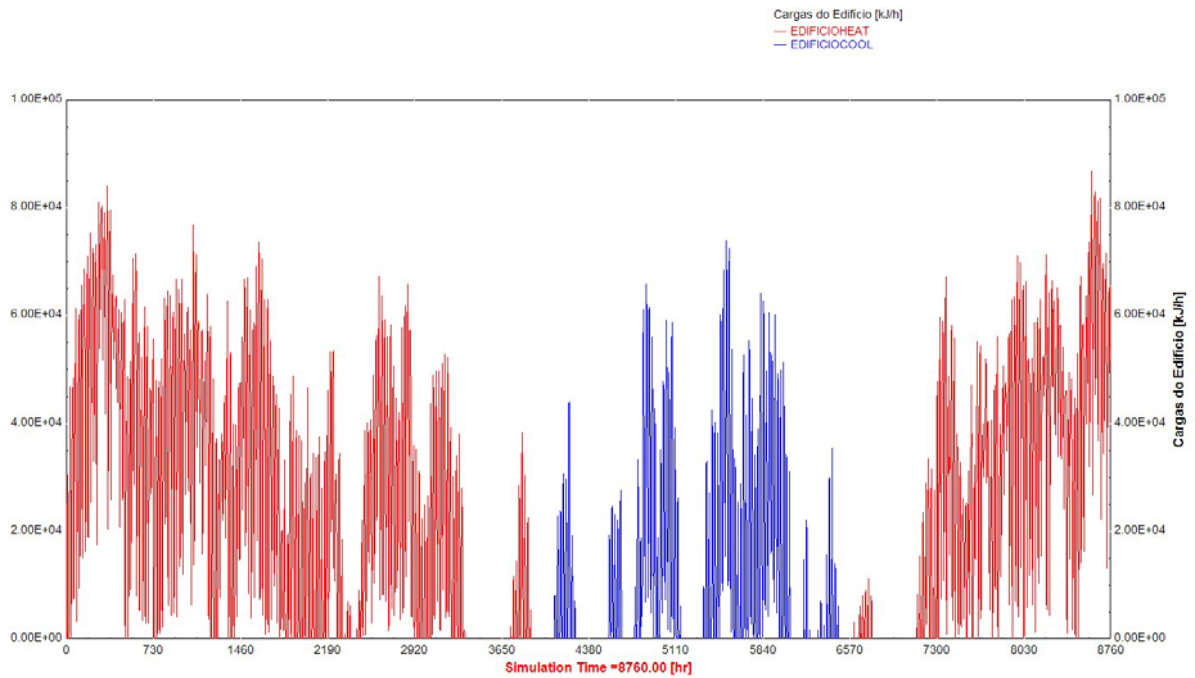


Figura 41: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Castelo Branco

Os resultados obtidos em termos de necessidades de climatização totais do edifício foram comparados com os verificados na aplicação do RCCTE, e que se apresenta na Tabela 25. Tal como expectável há uma aproximação das necessidades de aquecimento e alguns desvios no caso do arrefecimento.

Tabela 25: Resultados obtidos através do RCCTE e do TRNSYS

Concelho	Zona climática	Piso FA	RCCTE				TRNSYS	
			Nic FA [kWh/m ² .ano]	Nvc FA [kWh/m ² .ano]	Nic Edifício [kWh/ano]	Nvc Edifício [kWh/ano]	Energia aquec. [kWh/ano]	Energia arref. [kWh/ano]
Coimbra	II V2N	3º	69,79	1,53	39640	736	34249	3058
		2º	43,65	0,93				
		1º	45,85	0,93				
		R/C	73,45	0,93				
Lisboa	II V2S	3º	54,75	12,48	31005	6290	24564	5468
		2º	33,65	8,15				
		1º	35,55	8,15				
		R/C	58,09	8,15				
Faro	II V2S	3º	52,04	12,27	29143	6254	18803	6494
		2º	31,96	8,15				
		1º	33,54	8,15				
		R/C	53,57	8,15				
Évora	II V3S	3º	66,51	12,68	37779	6426	36687	6814
		2º	41,62	8,35				
		1º	43,70	8,35				
		R/C	69,98	8,35				
Porto	I2 V1N	3º	74,32	1,20	42772	654	37729	394
		2º	47,46	0,88				
		1º	49,57	0,88				
		R/C	79,78	0,88				
Castelo Branco	I2 V3N	3º	75,31	7,22	44055	3718	44081	7355
		2º	49,39	4,87				
		1º	51,51	4,87				
		R/C	82,45	4,87				
Bragança	I3 V2N	3º	136,47	1,40	82103	744	63616	2921
		2º	99,36	0,99				
		1º	101,91	0,99				
		R/C	144,31	0,99				

Na Figura 42 é representado um comparativo entre as necessidades energéticas anuais de climatização (obtidas com o TRNSYS) e de AQS do edifício multifamiliar, para os vários Concelhos estudados. Observa-se que em todas as localizações as necessidades de aquecimento são claramente superiores às de arrefecimento, sendo que no Porto estas são

praticamente inexistentes. Bragança é o Concelho onde se registam as maiores necessidades energéticas totais, contrastando com Faro.

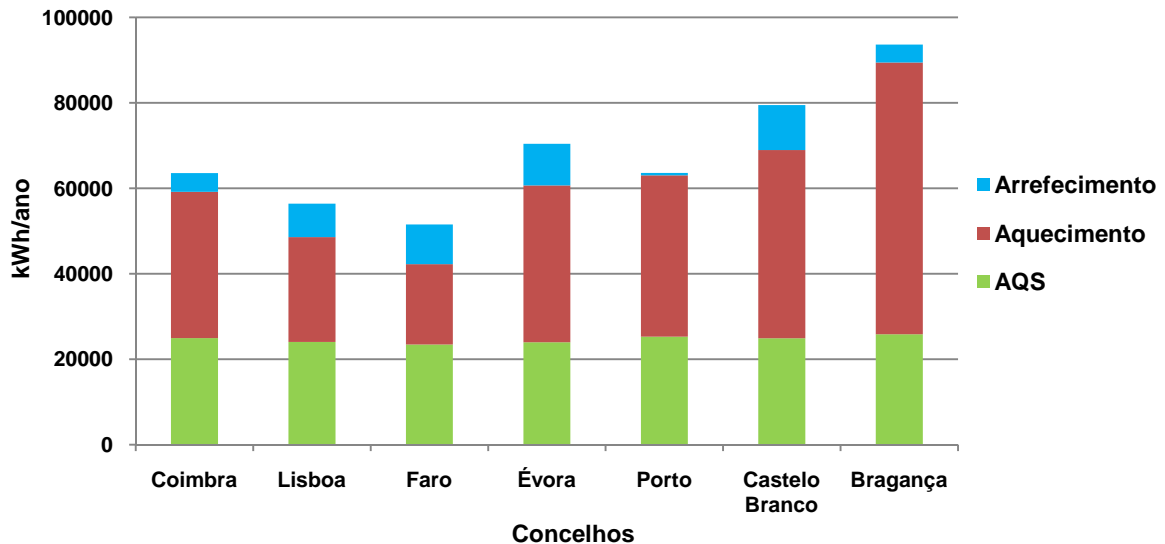


Figura 42: Comparativo das necessidades energéticas do edifício multifamiliar nas localizações estudadas

Através do programa TRNSYS, determinou-se as potências de aquecimento e arrefecimento (cargas térmicas), o que se apresenta na Tabela 26. Estes valores são necessários para o dimensionamento dos equipamentos de AVAC da instalação.

Tabela 26: Cargas térmicas máximas de aquecimento e arrefecimento no edifício multifamiliar

Concelhos	Carga térmica aquecimento		Carga térmica arrefecimento [kW]	
	Hora anual	Potência [kW]	Hora anual	Potência [kW]
Coimbra	297	22,59	5920	17,69
Lisboa	8601	19,11	5536	18,63
Faro	8625	18,87	5536	15,38
Évora	345	23,80	5536	20,05
Porto	8625	23,09	5944	10,25
Castelo Branco	8601	24,16	5536	20,56
Bragança	8649	28,13	5536	16,86

A carga térmica de aquecimento mais elevada ocorre em Bragança e a de arrefecimento mais elevada ocorre em Castelo Branco.

4.4 Análise energética do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização do edifício multifamiliar

As necessidades horárias de energia para climatização do edifício foram exportadas do TRNSYS, formatadas e inseridas nos perfis de carga do sistema solar simulado no Solterm, para as várias localizações estudadas.

A formatação consistiu nos seguintes passos:

- Converteu-se as cargas [kW] obtidas para as 8760 horas do ano, para um perfil horário mensal, em que as cargas variam durante as 24 horas do dia, e mês a mês.
- O Solterm processa os perfis de carga na unidade “litros”. Foi efectuada a conversão admitindo as seguintes condições:
 $c_{p \text{ água}} = 4,1868 \text{ kJ/kg.K}$
 $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$
 $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ (valor mínimo imposto pelo Solterm de diferença entre temperaturas de ida e retorno, em sistemas com recirculação)
- Os perfis de carga de arrefecimento foram afectados do EER (0,7) da máquina de absorção.

Todas as simulações foram efectuadas de acordo com o descrito no capítulo 3.3.3.

Na Figura 43 e Figura 44 estão representadas as necessidades energéticas mensais totais (AQS e climatização) do edifício multifamiliar, e correspondentes poupanças energéticas obtidas através do solar térmico com uma área instalada de 64 m^2 de colectores planos selectivos e de tubos de vácuo, respectivamente, no Concelho de Castelo Branco. As figuras com respeito às restantes localizações estão no Anexo G.

Verifica-se que as necessidades energéticas totais do edifício apresentam valores mais elevados precisamente nos meses (Dezembro e Janeiro) em que a radiação solar disponível é mais baixa (Figura 36), e daí uma menor contribuição energética percentual do solar térmico nesses meses. No estação de arrefecimento, com o decréscimo das necessidades energéticas, o solar térmico assegura praticamente o fornecimento energético total exigido. Como era expectável, a utilização de STV permite uma contribuição energética do solar térmico mais elevada à obtida com SPS.

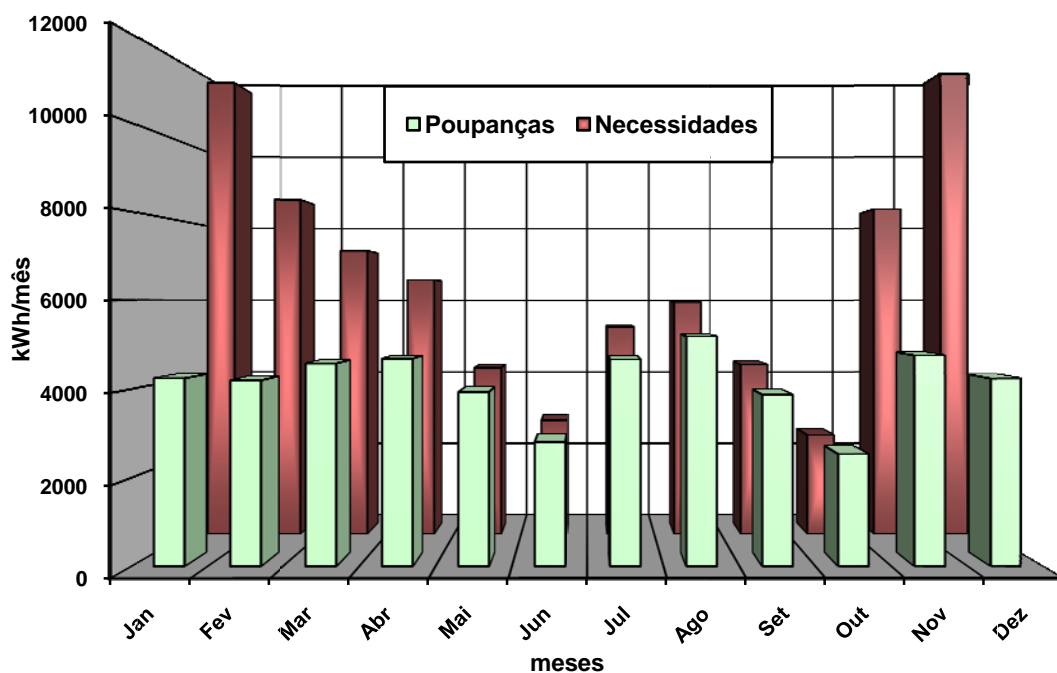


Figura 43: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Castelo Branco

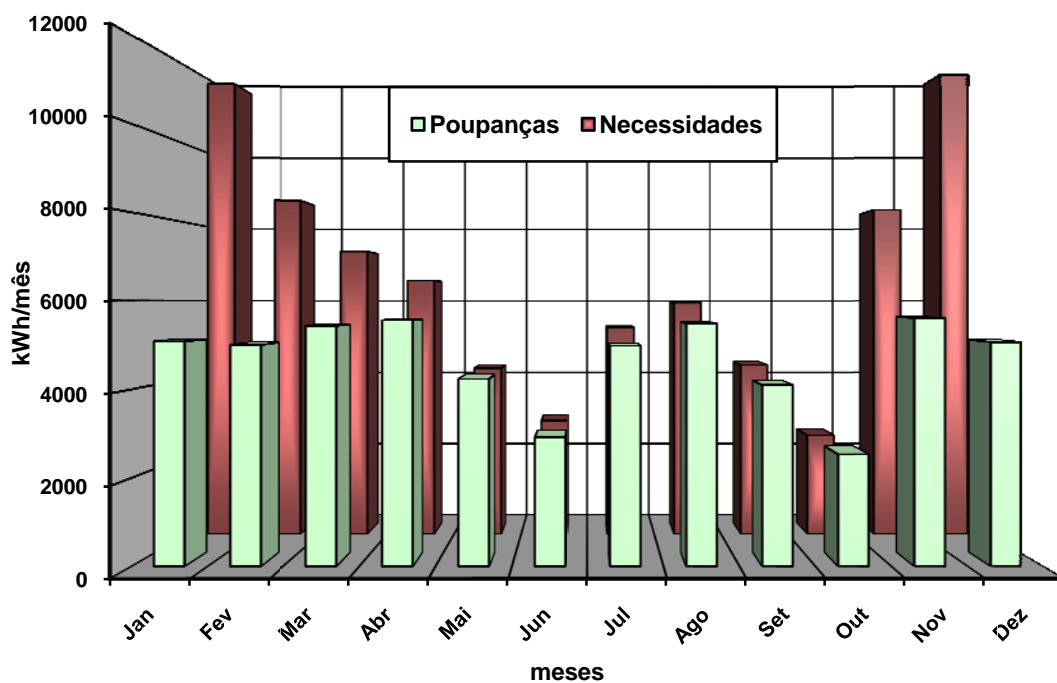


Figura 44: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Castelo Branco

Na Figura 45 e Figura 46 é representado o contributo solar mensal de AQS, aquecimento e arrefecimento, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar mensal, considerando uma área de 64 m² de colectores planos selectivos e de tubos de vácuo, respectivamente, instalados no edifício multifamiliar em Castelo Branco. As figuras com respeito às restantes localizações estão no Anexo H.

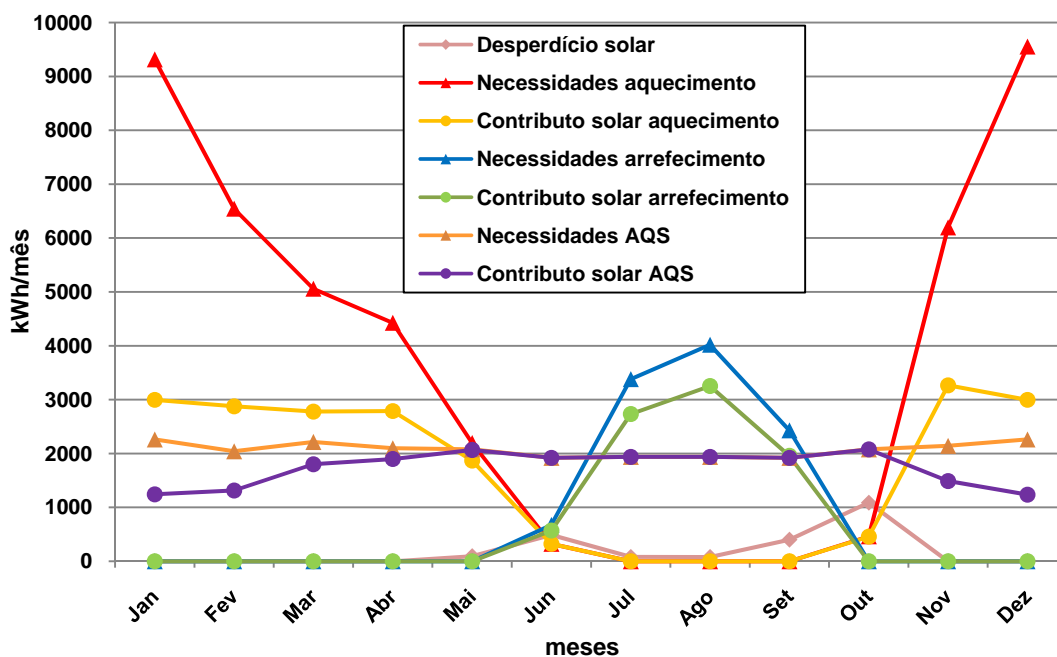


Figura 45: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Castelo Branco

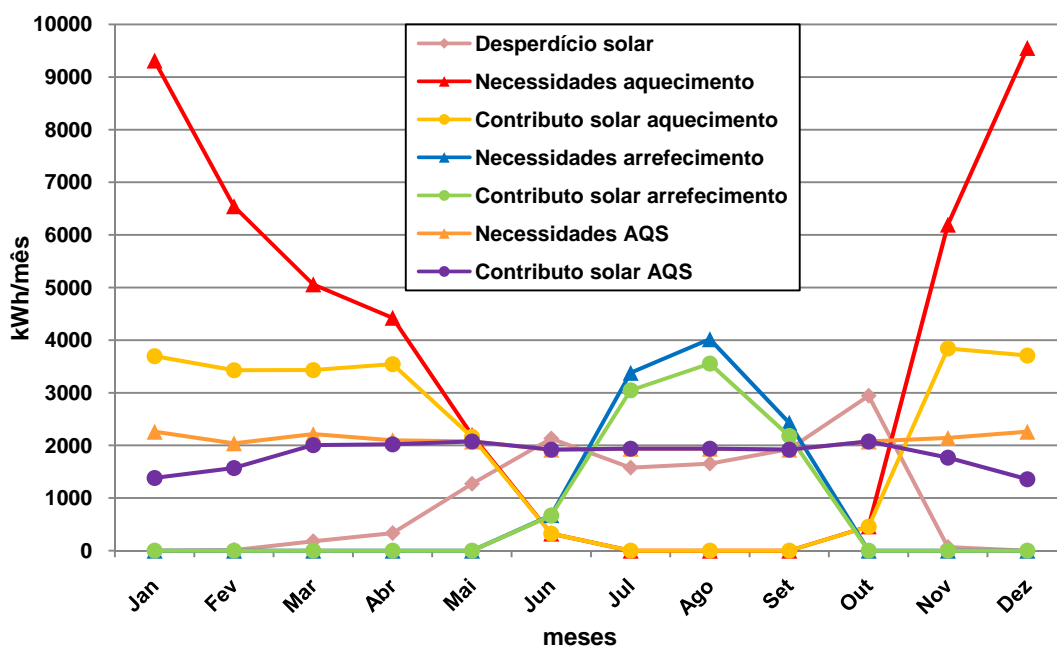


Figura 46: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Castelo Branco

As baixas necessidades energéticas de arrefecimento relativamente às de aquecimento no edifício multifamiliar, originam, para a área instalada de 64 m², desperdícios energéticos na época estival, especialmente com a utilização de STV. Verifica-se, também, que o sistema solar proporciona fracções solares de aquecimento mais elevadas nos meses de Março, Abril e Novembro em contraste com os meses mais frios, Dezembro e Janeiro. A colocação das necessidades de AQS como a primeira prioridade a ser coberta pelo solar térmico proporciona uma fracção solar de AQS muito alta, e relativamente constante ao longo do ano.

Na Figura 47 e Figura 48 observa-se o desempenho energético anual do solar térmico com uma área de 64 m² de SPS e STV, respectivamente, no apoio ao sistema de climatização. Verifica-se, como era expectável, que nos Concelhos onde as necessidades de climatização são mais baixas (p.e. Faro e Lisboa), o solar térmico proporciona uma contribuição energética consideravelmente alta, em contraste com aqueles em que as necessidades de climatização são mais altas (p.e. Bragança). A utilização de STV em detrimento de SPS, permite um desempenho ligeiramente superior.

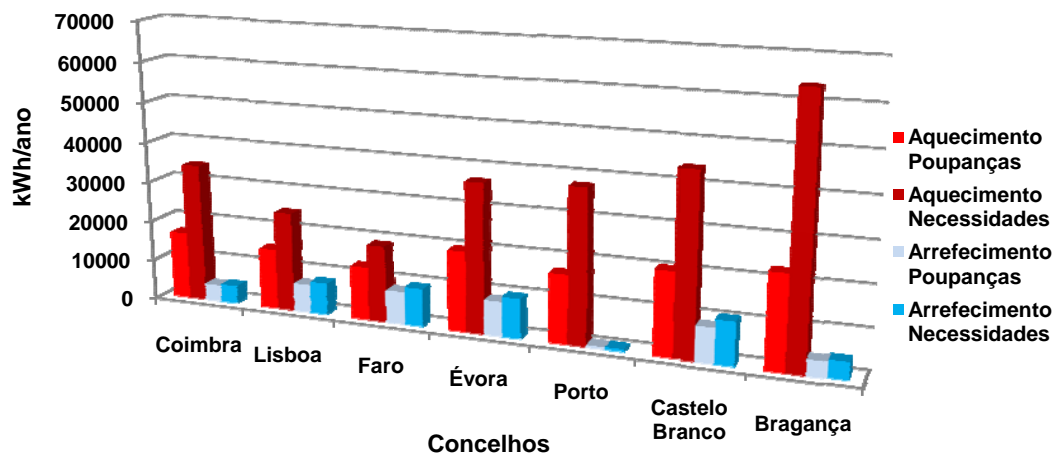


Figura 47: Necessidades energéticas de climatização e poupanças obtidas através do solar térmico com SPS no edifício multifamiliar

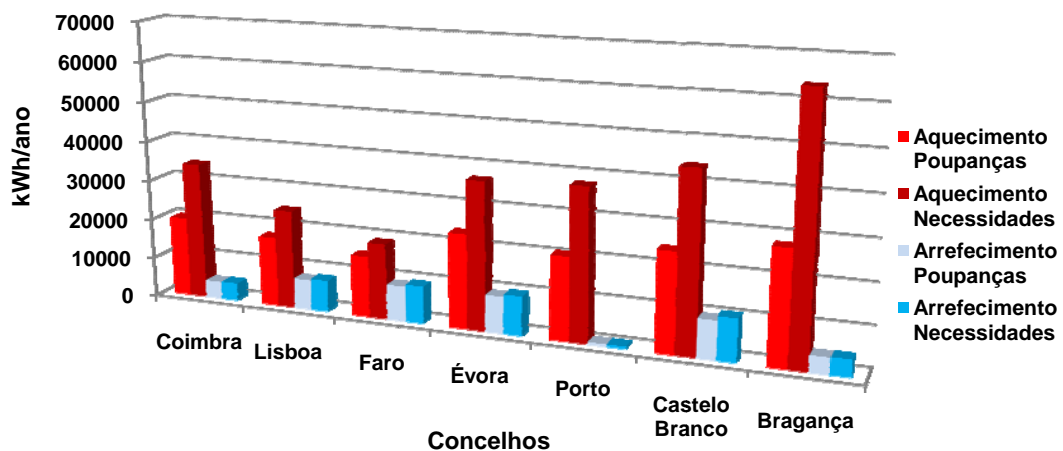


Figura 48: Necessidades energéticas de climatização e poupanças obtidas através do solar térmico com STV no edifício multifamiliar

Na Figura 49 verifica-se a quantidade de energia desperdiçada pelo sistema solar térmico, considerando uma área de 64 m² de SPS e STV. Faro é o local que apresenta maiores desperdícios energéticos, contrastando com Castelo Branco. Conclui-se, portanto, que entre as localizações estudadas, é em Castelo Branco que o solar térmico funciona com maior eficiência anual.

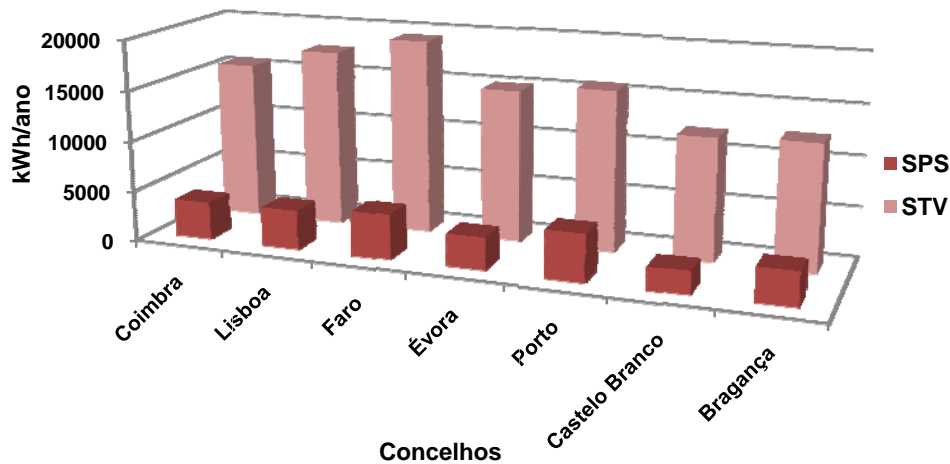


Figura 49: Energia desperdiçada pelo solar térmico com SPS e STV no edifício multifamiliar

Nas figuras seguintes apresenta-se a variação da fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área colectora instalada no edifício multifamiliar, considerando SPS e STV, nas várias localizações definidas.

Verifica-se que é nas necessidades de aquecimento que o acréscimo de colectores solares causa maior impacto em termos de aumento de fracção solar. Note-se, também, que a regra de 1 m²/ocupante para produção de AQS [1], que neste caso resulta numa área colectora de 32 m², permite, ainda assim, fracções solares de aquecimento e arrefecimento consideráveis, particularmente nas localizações onde as necessidades de aquecimento são menores.

Como era expectável, o sistema com STV proporciona fracções solares mais altas em relação ao sistema com SPS.

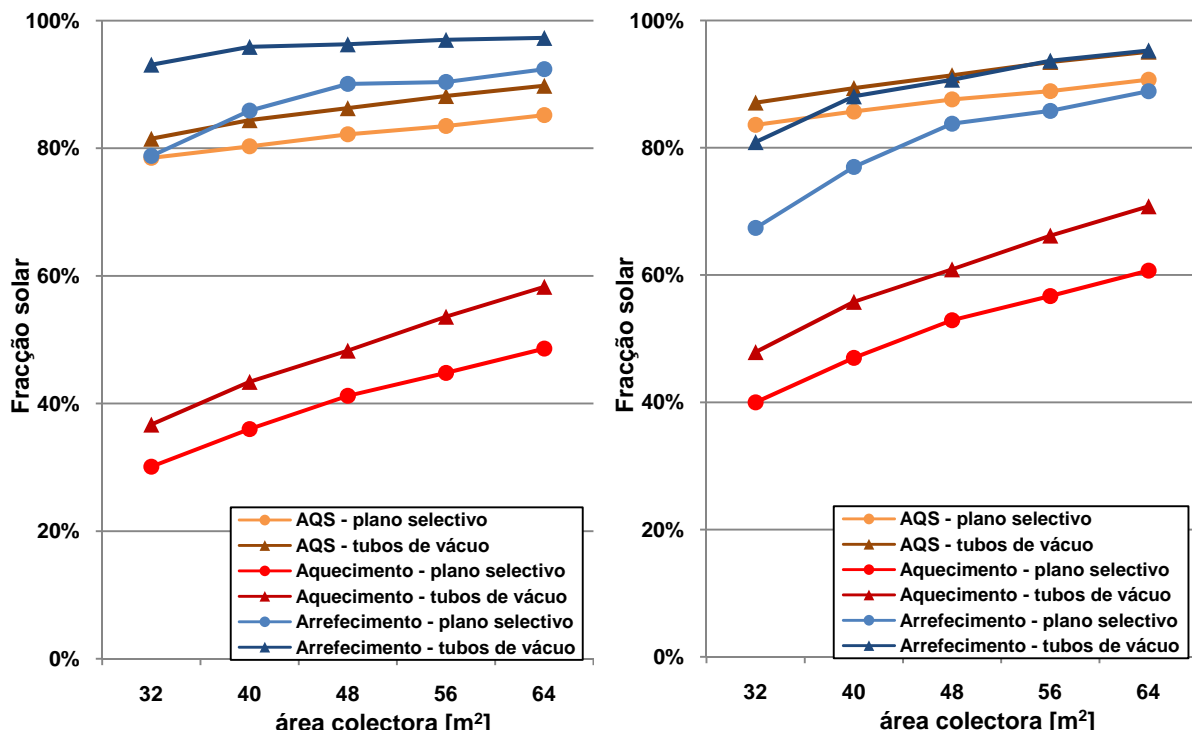


Figura 51: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, em Coimbra à esquerda, e Lisboa à direita

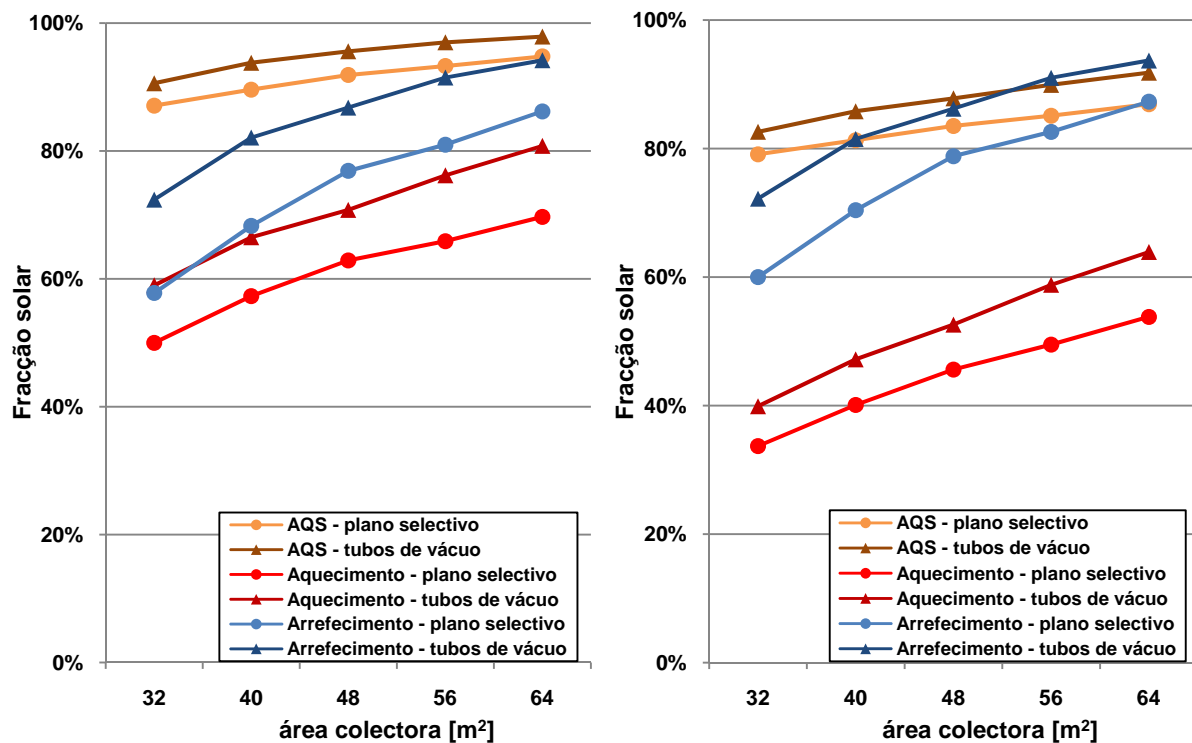


Figura 50: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, em Faro à esquerda, e Évora à direita

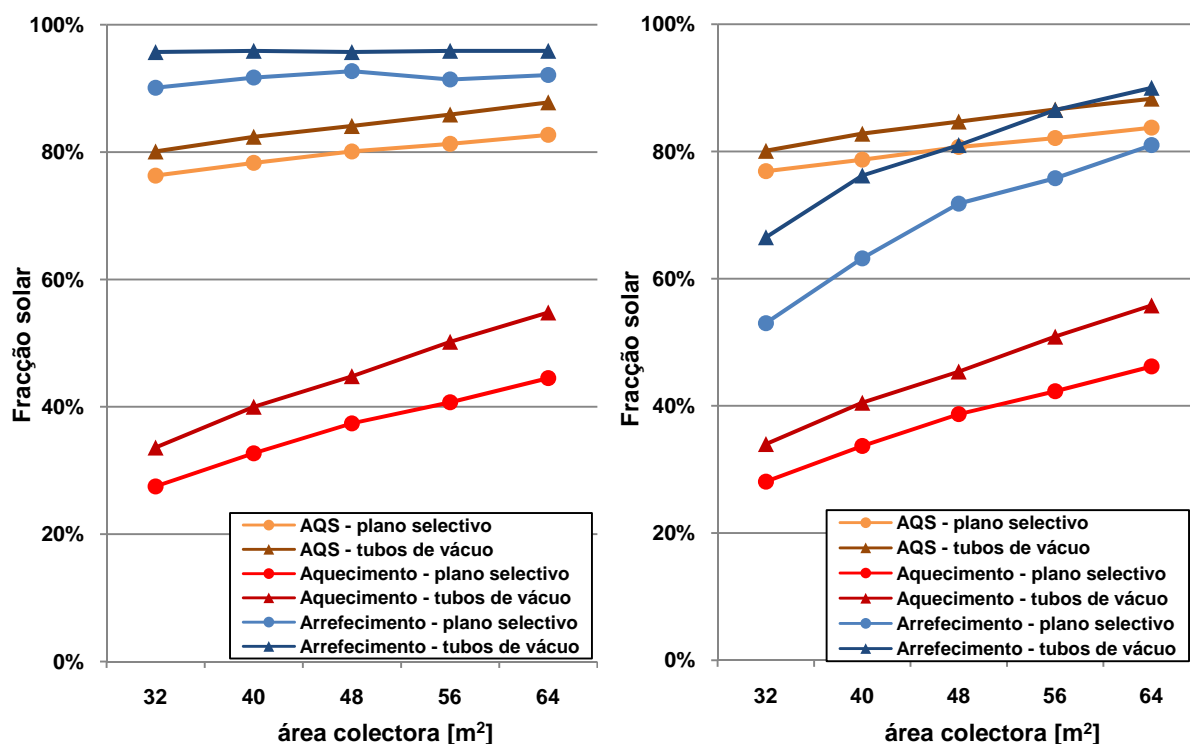


Figura 53: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, no Porto à esquerda, e Castelo Branco à direita

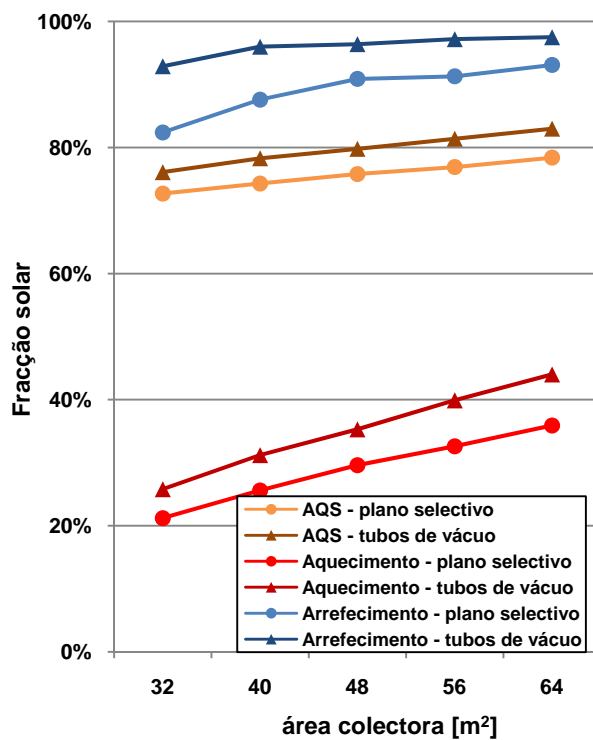


Figura 52: Fracção solar relativa à AQS, aquecimento e arrefecimento, em relação à área de SPS e STV no edifício multifamiliar, em Bragança

4.5 Avaliação da influência do sistema solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização, no desempenho energético do edifício multifamiliar, ao abrigo do RCCTE

Os resultados obtidos, nomeadamente o E_{solar} (contribuição útil do solar térmico para a produção de AQS) a incluir no cálculo de N_{ac} e as fracções solares relativas ao aquecimento e arrefecimento que foram incluídas no cálculo de N_{tc} e afectadas de um F_{pu} nulo, para os vários casos estudados, permitiram aferir da influência do solar térmico no desempenho energético do edifício, em termos de necessidades globais de energia primária.

Na Figura 54 verifica-se a variação do indicador energético $[N_{\text{tc}}/N_t]$ de necessidades de energia primária da FA do último piso do edifício multifamiliar, relativamente à área colectora instalada com SPS e STV. O aumento do número de colectores causa um impacto muito ligeiro no decréscimo de N_{tc}/N_t . Conclui-se, ainda, que a utilização de STV contribui pouco para a diminuição dos consumos de energia primária do edifício.

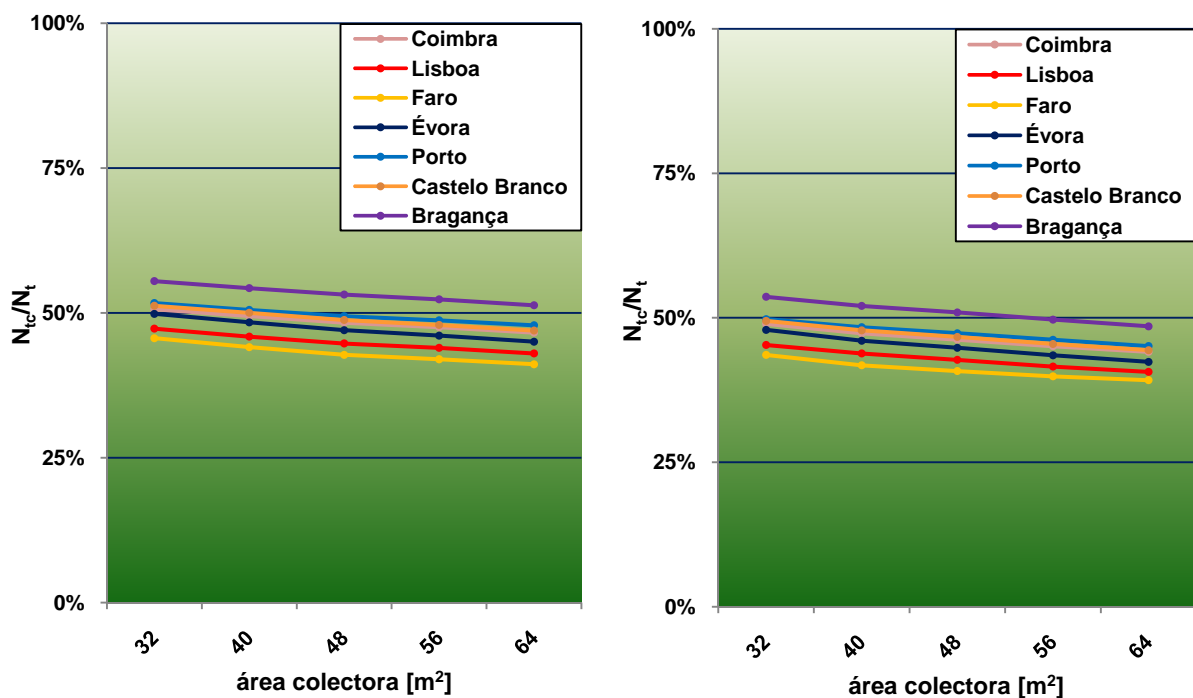


Figura 54: Variação de N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar, em relação à área colectora, com SPS à esquerda, e STV à direita

Na Figura 55 observa-se o N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar, de acordo com a regra de 1 m^2 /ocupante, ou seja, com uma área instalada de 32 m^2 , com o solar térmico a funcionar somente para AQS e para AQS e apoio à climatização. Conclui-se que esta segunda opção permite melhorias, embora ligeiras, do consumo de energia primária. Neste âmbito, a utilização de STV praticamente não proporcionou benefícios relevantes.

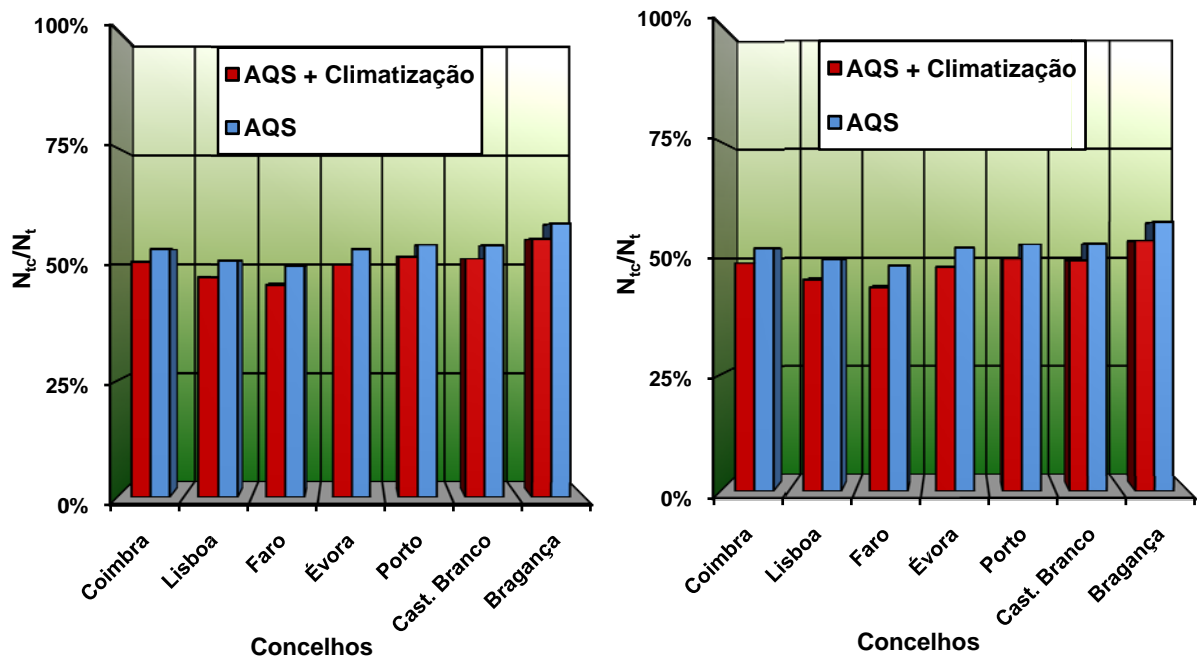


Figura 55: N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar, com o solar térmico com área de 32 m² a funcionar para AQS e AQS + climatização, com SPS à esquerda e STV à direita

Nas análises anteriores considerou-se que o sistema de apoio à preparação de AQS consistia num esquentador a gás com eficiência de 50%. Na Figura 56 apresenta-se a influência da eficiência de conversão do equipamento ($F_{pua} = 0,086 \text{ kgep/kWh}$) de preparação de AQS, no desempenho energético (N_{tc}/N_t) do edifício multifamiliar, considerando a FA do último piso e uma área colectora instalada de 64 m² de SPS e STV.

Verifica-se que o aumento da eficiência do sistema de apoio à preparação de AQS tem um impacto enorme na redução dos consumos de energia primária do edifício, à luz do RCCTE [1]. Uma eficiência a partir dos 85% permite que a FA considerada obtenha a classe A⁺, em todas as localizações definidas, e quer o solar térmico tenha STV ou SPS.

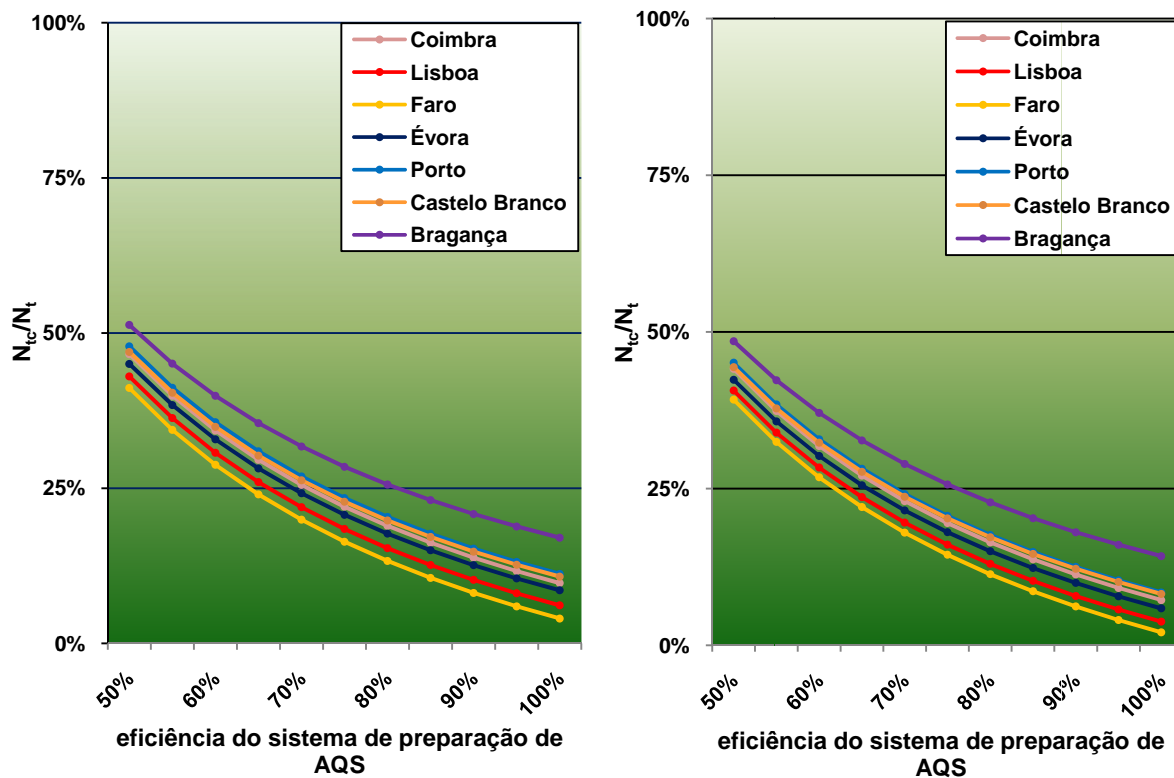


Figura 56: N_{tc}/N_t da FA do último piso do edifício multifamiliar em relação à eficiência de conversão do sistema de preparação de AQS, com SPS à esquerda, e STV à direita

5 CONCLUSÕES

Este último capítulo apresenta uma retrospectiva geral sobre o trabalho desenvolvido. O capítulo termina com uma sugestão para trabalhos futuros.

A ilação fundamental a retirar da análise efectuada é que a utilização de energias renováveis, nomeadamente o solar térmico, para apoiar os sistemas de climatização de edifícios residenciais novos que observam o RCCTE, tem uma influência pouco significativa nas necessidades globais de energia primária dos mesmos. O facto do RCCTE considerar que os edifícios apenas são climatizados, em média, 10% do tempo, e com a consequente e idêntica redução nas necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, reduz substancialmente as parcelas relativas à climatização que fazem parte da expressão de cálculo das necessidades globais de energia primária, o que limita o possível impacto da utilização do solar térmico para apoio à climatização, em termos regulamentares. Relativamente à classe energética, o desempenho do edifício é mais sensível à eficiência do sistema de preparação de águas quentes sanitárias.

Em relação às tecnologias de colectores solares abordadas, o colector plano selectivo mostrou ser o mais eficiente com uma boa relação entre energia captada e energia desperdiçada, contrastando com o colector de tubos de vácuo, que, apesar de proporcionar contribuições energéticas superiores, originou elevados desperdícios de energia em várias aplicações. Em termos de classe energética das fracções autónomas, a utilização de colectores de tubos de vácuo é benéfica, mas é necessário estudar a relação custo/benefício.

O espaço disponível para a instalação de colectores solares mostrou ser um factor importante em termos de penalização energética das fracções autónomas do edifício multifamiliar. O crescimento do número de pisos provocou o aumento dos consumos energéticos das fracções autónomas, mais evidente ainda com a utilização do colector “padrão Adene”, que em relação ao colector plano selectivo analisado teve um desempenho muito fraco, e colocou as fracções autónomas como não regulamentares em termos de necessidades globais de energia primária a partir de um pequeno aumento do número de pisos do edifício.

Verificou-se que a regra de 1 m² de área colectora por ocupante para produção de AQS, instituída no RCCTE, produz excessos de energia que podem ser aproveitados para apoiar o sistema de climatização, embora com fracções solares de aquecimento que variam bastante consoante a zona climática onde está localizado o edifício. Ainda assim, e independentemente da localização, nos meses em que há menor radiação solar disponível, nomeadamente Dezembro e Janeiro, a contribuição energética do solar térmico para as necessidades de aquecimento é muito baixa. Por outro lado, foi também nas necessidades de aquecimento que o aumento da área colectora provocou o maior impacto.

Observou-se, também, que as localizações onde existe maior radiação solar disponível são, como era expectável, beneficiadas em termos de consumo energético, visto obter-se uma contribuição energética mais elevada por parte do solar térmico. Em relação às localizações estudadas, o clima de Castelo Branco, em contraste com Faro, revelou ser aquele que

proporciona a melhor eficiência de funcionamento do sistema solar térmico quando este produz AQS e apoia o sistema de climatização.

As habitações consideradas nos casos de estudo, nomeadamente o edifício unifamiliar e o multifamiliar, tendo sido definidos de forma a cumprir pela margem mínima as necessidades energéticas de aquecimento de referência (N_i), possuíam necessidades energéticas de arrefecimento relativamente baixas, independentemente das localizações estudadas, o que originou uma fraca eficiência do sistema solar térmico na estação de arrefecimento.

Sugere-se para um trabalho futuro, o estudo da aplicação da tecnologia de arrefecimento solar em edifícios de serviços com fortes cargas internas, utilizando uma máquina de absorção de efeito simples e também de efeito duplo.

Bibliografia

- [1] Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios; Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril.
- [2] Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios; Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril.
- [3] Sistema de Certificação Energética dos Edifícios; Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril.
- [4] C. Pina dos Santos e L. Matias. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, 2006.
- [5] S. Camelo, C. Pina dos Santos, A. Ramalho, C. Horta, H. Gonçalves e E. Maldonado. *Manual de Apoio à aplicação do RCCTE*. INETI, 2006.
- [6] J.C. Costa e E.P. Lebeña. *Manual de Conversão Térmica da Energia Solar*. INETI, 2008.
- [7] *Energia Solar Térmica – manual sobre tecnologias, projecto e instalação*. Projecto GREENPRO.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Ashrae Fundamentals Handbook*, 2005.
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Ashrae HVAC Application Handbook*. 2007.
- [10] J. Duffie e W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 1991
- [11] U. Eicker. *Solar Technologies for Buildings*. John Wiley & Sons, Ltd., 2003
- [12] R. Aguiar. *Manual de Instalação e Utilização do software Solterm 5*. Versão 1.5, 2007
- [13] L. Bragança. *Princípios de Desenho e Metodologias de Avaliação da Sustentabilidade das Construções*
- [14] Mateus, Ricardo; *Novas Tecnologias Construtivas com vista à Sustentabilidade da Construção* – Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, 2004

- [15] J.L. Alexandre e E. Maldonado. *Apontamentos Climatização*. 5ºano, MIEM, 2008
- [16] P. Vaquero Ferreira. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica: *Sistemas de Ventilação Híbridos em Edifícios*, 2006
- [17] J. Carlos Matos. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica: *Serviço de Venda de Água Quente Solar – Condições Tecnológicas e de Gestão*, 2006
- [18] Doreer, V., A. Weber, RESHYVENT: Description of reference buildings and ventilations systems, EMPA – Swiss Federation Laboratories for Materials Testing and Research, Dubendorf, Switzerland, 2004
- [19] H. Duarte Ferreira. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica: *Estudo exploratório sobre a Utilização do RCCTE na Avaliação do Desempenho Passivo de Edifícios Residenciais*, 2008
- [20] Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008. *Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética – Portugal Eficiência 2015*. Diário da República, 1.ª série – N.º 97 – 20 de Maio de 2008
- [21] Água Quente Solar para Portugal. ADENE/DGE/INETI, Lisboa, 2001
- [22] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/europe.htm>
- [23] A.C. Pereira. *Introdução ao novo RCCTE – 1ª Parte – Divisão Climática*
- [24] Aguasol Enginyeria. Software *TRANSOL*. Esquemas de princípio
- [25] M.J. Carvalho e A. Neves. *Sistema solar para aquecimento ambiente e aquecimento de piscinas – uma solução promissora para climas do sul da Europa*. CIES 2006 – XIII Congresso Ibérico e VIII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar 9-10 Novembro 2006, Lisboa
- [26] Regime Geral das Edificações Urbanas; Decreto-Lei n.º 290/2007
- [27] Pina dos Santos, J. V. Paiva. *Caracterização Térmica de Paredes de Alvenaria - ITE 12*. 7ª Ed. LNEC, 2008
- [28] <http://www.spes.pt/pagina/>
- [29] <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>, *TRNSYS 16 – Getting Started Manual*

ANEXO A: Características e valores de referência dos Concelhos

Zona Climática	Concelho	População (*)	Alt. [m] (**)	Região (***)	Nº GD	Aquec. (meses)	Temp. Proj. Verão [°C]	Amplitude Térm. [°C]	G _{sul} Aquec. [kWh/m ² /mês]	θ _{atm} [°C]
I1-V1N	Aveiro	55291	26	B	1390	6	29	9	108	19
I1-V1S	Portimão	32433	2	B	940	5,3	31	11	108	21
I1-V2N	Coimbra	101069	44	A	1460	6	33	13	108	19
I1-V2S	Lisboa	564657	56	A	1190	5,3	32	11	108	23
I1-V3N	Entroncamento	18036	49	A	1470	6	35	15	108	22
I1-V3S	Évora	41159	247	A	1390	5,7	35	17	108	23
I2-V1N	Porto	263131	74	B	1610	6,7	30	9	93	19
I2-V2N	Braga	109460	168	A	1800	7	32	13	93	19
I2-V3N	Castelo Branco	30649	384	A	1650	6,7	35	15	93	22
I2-V3S	Portalegre	15238	438	A	1740	6,7	34	14	93	23
I3-V1N	Guarda	26061	897	B	2500	8	30 (****)	13	90	19
I3-V2N	Bragança	20309	570	A	2850	8	33	15	90	19
I3-V3N	Lamego	8848	549	A	2360	6,3	35	15	90	22

(*) Censos 2001 – população residente

(**) Valores de altitude média dos Concelhos retirados de <http://www.freemeteo.com/>

(***) A região A inclui todo o território nacional excepto as localidades situadas numa faixa de 5 km de largura junto à costa e ou de altitude superior a 600 m, incluídas na região B

(****) Devido à altitude média de Guarda se encontrar no intervalo]800;1000], a temperatura exterior de projecto de Verão passa de 31°C para 30°C

ANEXO B: Valores médios da intensidade da radiação solar para a estação convencional de arrefecimento, nas zonas climáticas estudadas

Zona Climática	Concelho	Radiação Solar Estação de Arrefecimento [kWh/m ²]								
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	HOR
I1-V1N	Aveiro	200	300	420	430	380	430	420	300	730
I1-V1S	Portimão	200	310	420	430	380	440	430	320	760
I1-V2N	Coimbra	200	320	450	470	420	470	450	320	790
I1-V2S	Lisboa	200	340	470	460	380	460	470	340	820
I1-V3N	Entroncamento	200	320	450	460	400	460	450	320	800
I1-V3S	Évora	210	330	460	460	400	470	460	330	820
I2-V1N	Porto	200	300	420	430	380	430	420	300	730
I2-V2N	Braga	200	320	450	470	420	470	450	320	790
I2-V3N	Castelo Branco	200	320	450	460	400	460	450	320	800
I2-V3S	Portalegre	210	330	460	460	400	470	460	330	820
I3-V1N	Guarda	200	300	420	430	380	430	420	300	730
I3-V2N	Bragança	200	320	450	470	420	470	450	320	790
I3-V3N	Lamego	200	320	450	460	400	460	450	320	800

ANEXO C: Valores de entrada e saída (retirado do ficheiro *.inf criado pelo TRNBuild) do bloco “Type 56” utilizado na simulação do edifício multifamiliar

***** REQUIRED INPUTS *****

*InpNR Label UNIT INPUT DESCRIPTION

```
* 1 TAMB C AMBIENT TEMPERATURE
* 2 ARELHUM % RELATIVE AMBIENT HUMIDITY
* 3 TSKY C FIKTIVE SKY TEMPERATURE
* 4 ITNORTH kJ/hr.m^2 INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION NORTH
* 5 ITSOUTH kJ/hr.m^2 INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION SOUTH
* 6 ITEAST kJ/hr.m^2 INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION EAST
* 7 ITWEST kJ/hr.m^2 INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION WEST
* 8 ITHORIZONT kJ/hr.m^2 INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION HORIZONT
* 9 ITSHADSOUT kJ/hr.m^2 INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION SHADSOUTH
* 10 IBNORTH kJ/hr.m^2 INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION NORTH
* 11 IBSOUTH kJ/hr.m^2 INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION SOUTH
* 12 IBEAST kJ/hr.m^2 INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION EAST
* 13 IBWEST kJ/hr.m^2 INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION WEST
* 14 IBHORIZONT kJ/hr.m^2 INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION HORIZONT
* 15 IBSHADSOUT kJ/hr.m^2 INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION SHADSOUTH
* 16 AINORTH degrees ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION NORTH
* 17 AISOUTH degrees ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION SOUTH
* 18 AIEAST degrees ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION EAST
* 19 AIWEST degrees ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION WEST
* 20 AIHORIZONT degrees ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION HORIZONT
* 21 AISHADSOUT degrees ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION SHADSOUTH
* 22 CCONT_NAT_ any INPUT
* 23 T_COOL_ON any INPUT
* 24 S_NORTH any INPUT
* 25 S_SOUTH any INPUT
* 26 S_EAST any INPUT
* 27 S_WEST any INPUT
* 28 BRIGHT any INPUT
```

***** DESIRED OUTPUTS *****

*OutNr Label Unit ZNr Zone Surface OUTPUT DESCRIPTION

```
* 1 TAIR 1 C 1 3ºPISO_E air temperature of zone
* 2 TAIR 2 C 2 2ºPISO_E air temperature of zone
* 3 TAIR 3 C 3 1ºPISO_E air temperature of zone
* 4 TAIR 4 C 4 R/C_E air temperature of zone
* 5 TAIR 5 C 5 3ºPISO_W air temperature of zone
* 6 TAIR 6 C 6 2ºPISO_W air temperature of zone
* 7 TAIR 7 C 7 1ºPISO_W air temperature of zone
* 8 TAIR 8 C 8 R/C_W air temperature of zone
* 9 TAIR 9 C 9 VÃO_ESCADA air temperature of zone
* 10 TAIR 10 C 10 GARAGEM air temperature of zone
* 11 QSENS 1 kJ/hr 1 3ºPISO_E sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 12 QSENS 2 kJ/hr 2 2ºPISO_E sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 13 QSENS 3 kJ/hr 3 1ºPISO_E sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 14 QSENS 4 kJ/hr 4 R/C_E sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 15 QSENS 5 kJ/hr 5 3ºPISO_W sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 16 QSENS 6 kJ/hr 6 2ºPISO_W sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 17 QSENS 7 kJ/hr 7 1ºPISO_W sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 18 QSENS 8 kJ/hr 8 R/C_W sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 19 QSENS 9 kJ/hr 9 VÃO_ESCADA sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 20 QSENS 10 kJ/hr 10 GARAGEM sens. energy demand of zone, heating(-), cooling(+)
* 21 QCSURF 1 kJ/hr 1 3ºPISO_E total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 22 QCSURF 2 kJ/hr 2 2ºPISO_E total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 23 QCSURF 3 kJ/hr 3 1ºPISO_E total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 24 QCSURF 4 kJ/hr 4 R/C_E total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 25 QCSURF 5 kJ/hr 5 3ºPISO_W total convection to air from all surf. incl. int.shading
```

* 26	QCSURF	6 kJ/hr	6 2ºPISO_W	total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 27	QCSURF	7 kJ/hr	7 1ºPISO_W	total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 28	QCSURF	8 kJ/hr	8 R/C_W	total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 29	QCSURF	9 kJ/hr	9 VÃO_ESCADA	total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 30	QCSURF	10 kJ/hr	10 GARAGEM	total convection to air from all surf. incl. int.shading
* 31	QINF	1 kJ/hr	1 3ºPISO_E	sens. infiltration energy gain of zone
* 32	QINF	2 kJ/hr	2 2ºPISO_E	sens. infiltration energy gain of zone
* 33	QINF	3 kJ/hr	3 1ºPISO_E	sens. infiltration energy gain of zone
* 34	QINF	4 kJ/hr	4 R/C_E	sens. infiltration energy gain of zone
* 35	QINF	5 kJ/hr	5 3ºPISO_W	sens. infiltration energy gain of zone
* 36	QINF	6 kJ/hr	6 2ºPISO_W	sens. infiltration energy gain of zone
* 37	QINF	7 kJ/hr	7 1ºPISO_W	sens. infiltration energy gain of zone
* 38	QINF	8 kJ/hr	8 R/C_W	sens. infiltration energy gain of zone
* 39	QINF	9 kJ/hr	9 VÃO_ESCADA	sens. infiltration energy gain of zone
* 40	QINF	10 kJ/hr	10 GARAGEM	sens. infiltration energy gain of zone
* 41	QVENT	1 kJ/hr	1 3ºPISO_E	sens. ventilation energy gain of zone
* 42	QVENT	2 kJ/hr	2 2ºPISO_E	sens. ventilation energy gain of zone
* 43	QVENT	3 kJ/hr	3 1ºPISO_E	sens. ventilation energy gain of zone
* 44	QVENT	4 kJ/hr	4 R/C_E	sens. ventilation energy gain of zone
* 45	QVENT	5 kJ/hr	5 3ºPISO_W	sens. ventilation energy gain of zone
* 46	QVENT	6 kJ/hr	6 2ºPISO_W	sens. ventilation energy gain of zone
* 47	QVENT	7 kJ/hr	7 1ºPISO_W	sens. ventilation energy gain of zone
* 48	QVENT	8 kJ/hr	8 R/C_W	sens. ventilation energy gain of zone
* 49	QVENT	9 kJ/hr	9 VÃO_ESCADA	sens. ventilation energy gain of zone
* 50	QVENT	10 kJ/hr	10 GARAGEM	sens. ventilation energy gain of zone
* 51	QCUP	1 kJ/hr	1 3ºPISO_E	sens. coupling energy gain of zone
* 52	QCUP	2 kJ/hr	2 2ºPISO_E	sens. coupling energy gain of zone
* 53	QCUP	3 kJ/hr	3 1ºPISO_E	sens. coupling energy gain of zone
* 54	QCUP	4 kJ/hr	4 R/C_E	sens. coupling energy gain of zone
* 55	QCUP	5 kJ/hr	5 3ºPISO_W	sens. coupling energy gain of zone
* 56	QCUP	6 kJ/hr	6 2ºPISO_W	sens. coupling energy gain of zone
* 57	QCUP	7 kJ/hr	7 1ºPISO_W	sens. coupling energy gain of zone
* 58	QCUP	8 kJ/hr	8 R/C_W	sens. coupling energy gain of zone
* 59	QCUP	9 kJ/hr	9 VÃO_ESCADA	sens. coupling energy gain of zone
* 60	QCUP	10 kJ/hr	10 GARAGEM	sens. coupling energy gain of zone
* 61	QGCONV	1 kJ/hr	1 3ºPISO_E	internal convective gains of zone
* 62	QGCONV	2 kJ/hr	2 2ºPISO_E	internal convective gains of zone
* 63	QGCONV	3 kJ/hr	3 1ºPISO_E	internal convective gains of zone
* 64	QGCONV	4 kJ/hr	4 R/C_E	internal convective gains of zone
* 65	QGCONV	5 kJ/hr	5 3ºPISO_W	internal convective gains of zone
* 66	QGCONV	6 kJ/hr	6 2ºPISO_W	internal convective gains of zone
* 67	QGCONV	7 kJ/hr	7 1ºPISO_W	internal convective gains of zone
* 68	QGCONV	8 kJ/hr	8 R/C_W	internal convective gains of zone
* 69	QGCONV	9 kJ/hr	9 VÃO_ESCADA	internal convective gains of zone
* 70	QGCONV	10 kJ/hr	10 GARAGEM	internal convective gains of zone
* 71	DQAIR	1 kJ	1 3ºPISO_E	change int. sens. energy of zone air since start
* 72	DQAIR	2 kJ	2 2ºPISO_E	change int. sens. energy of zone air since start
* 73	DQAIR	3 kJ	3 1ºPISO_E	change int. sens. energy of zone air since start
* 74	DQAIR	4 kJ	4 R/C_E	change int. sens. energy of zone air since start
* 75	DQAIR	5 kJ	5 3ºPISO_W	change int. sens. energy of zone air since start
* 76	DQAIR	6 kJ	6 2ºPISO_W	change int. sens. energy of zone air since start
* 77	DQAIR	7 kJ	7 1ºPISO_W	change int. sens. energy of zone air since start
* 78	DQAIR	8 kJ	8 R/C_W	change int. sens. energy of zone air since start
* 79	DQAIR	9 kJ	9 VÃO_ESCADA	change int. sens. energy of zone air since start
* 80	DQAIR	10 kJ	10 GARAGEM	change int. sens. energy of zone air since start
* 81	SQHEAT	kJ/hr		sum of heating demand of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	
* 82	SQCOOL	kJ/hr		sum of cooling demand of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	
* 83	SQCSURF	kJ/hr		sum of surf. convective gains of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	
* 84	SQINF	kJ/hr		sum of infiltration gains of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	
* 85	SQVENT	kJ/hr		sum of ventilation gains of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	
* 86	SQCOUP	kJ/hr		sum of coupling gains of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	
* 87	SQGCONV	kJ/hr		sum of internal convect. gains of , 3ºPISO_E, 2ºPISO_E, 1ºPISO_E, R/C_E, 3ºPISO_W,
			2ºPISO_W, 1ºPISO_W, R/C_W	

ANEXO D: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime “free float” ao longo do ano, nas localizações estudadas

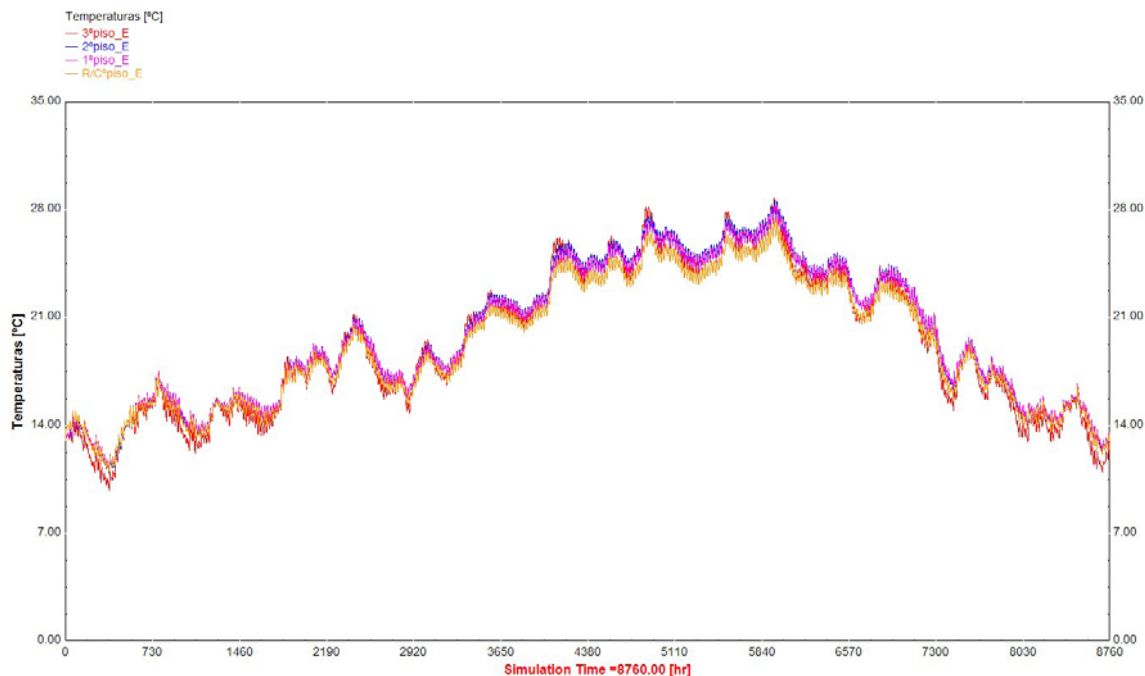


Figura 57: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Coimbra

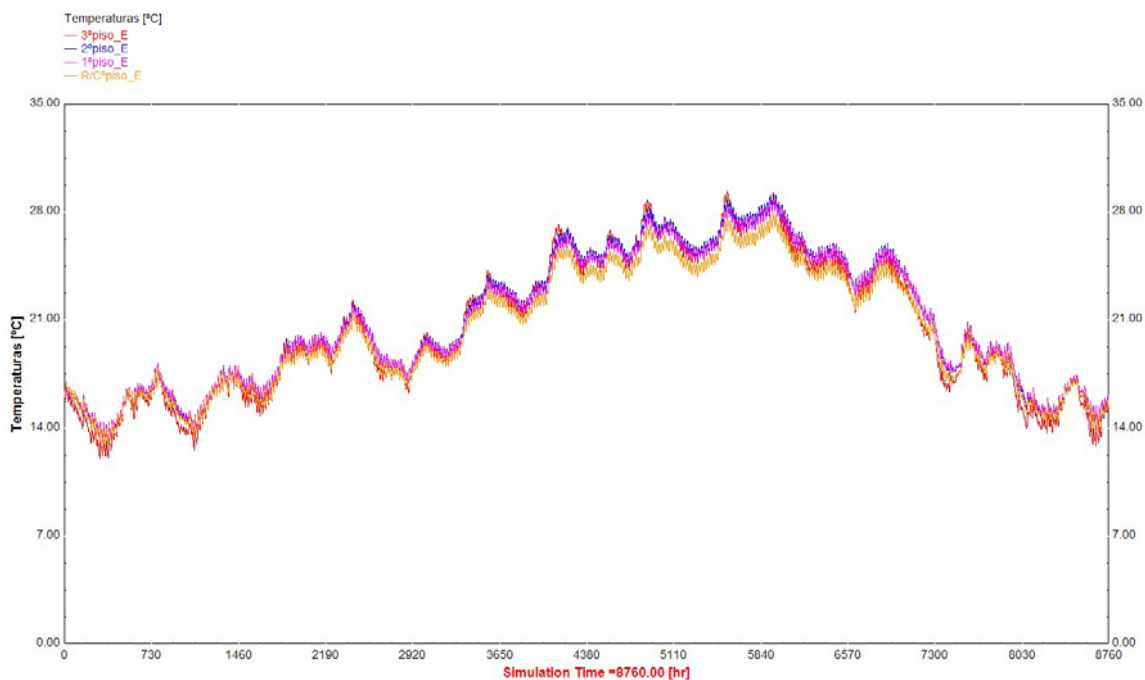


Figura 58: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Lisboa

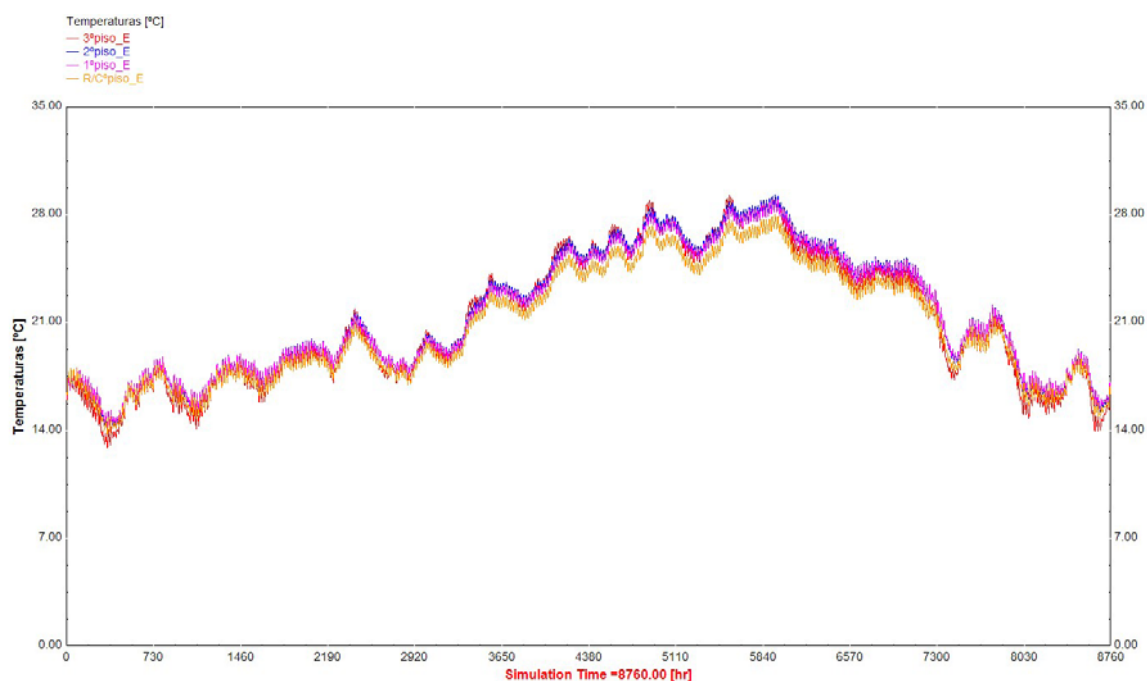


Figura 59: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Faro

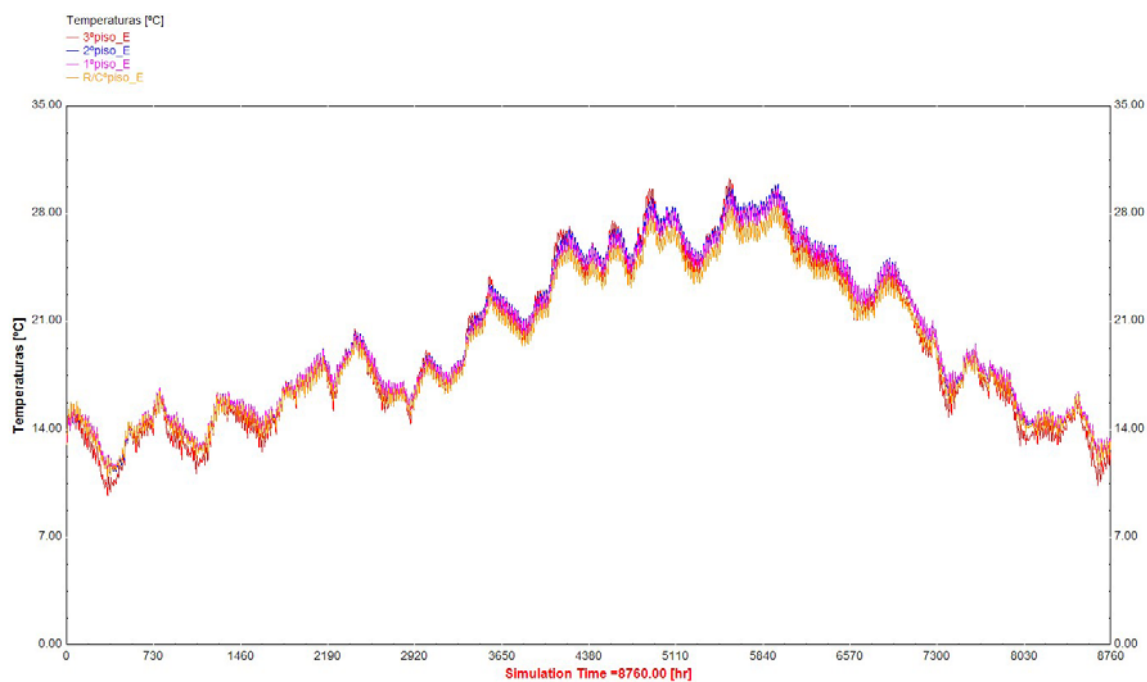


Figura 60: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Évora

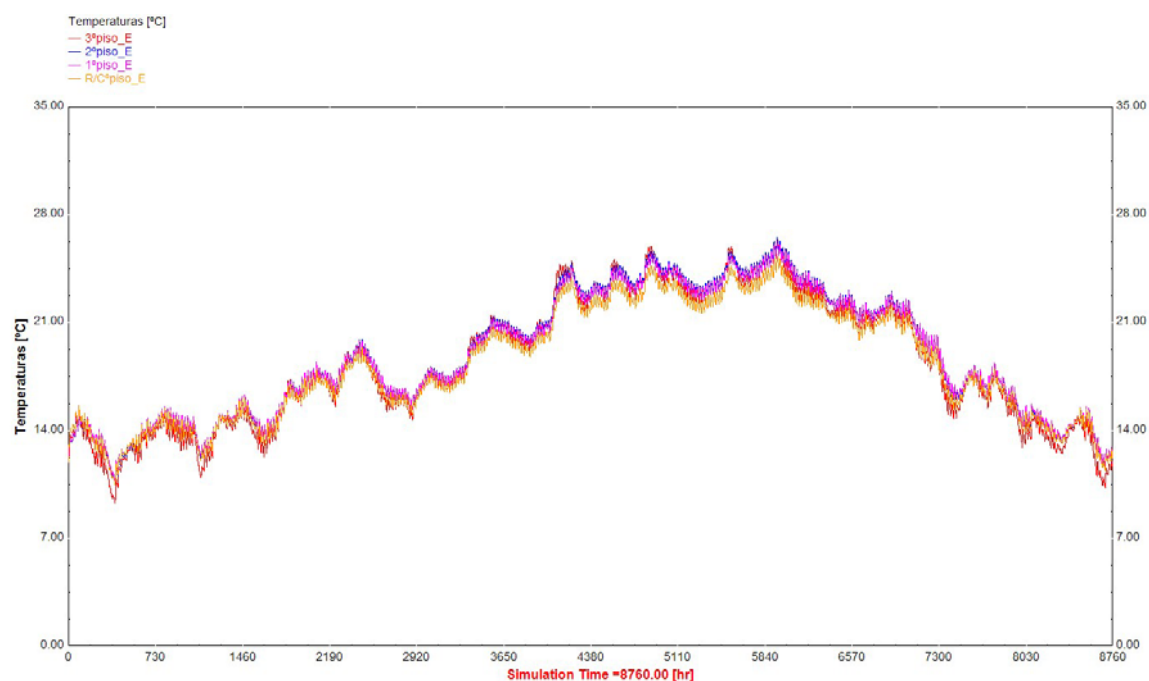


Figura 61: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", no Porto

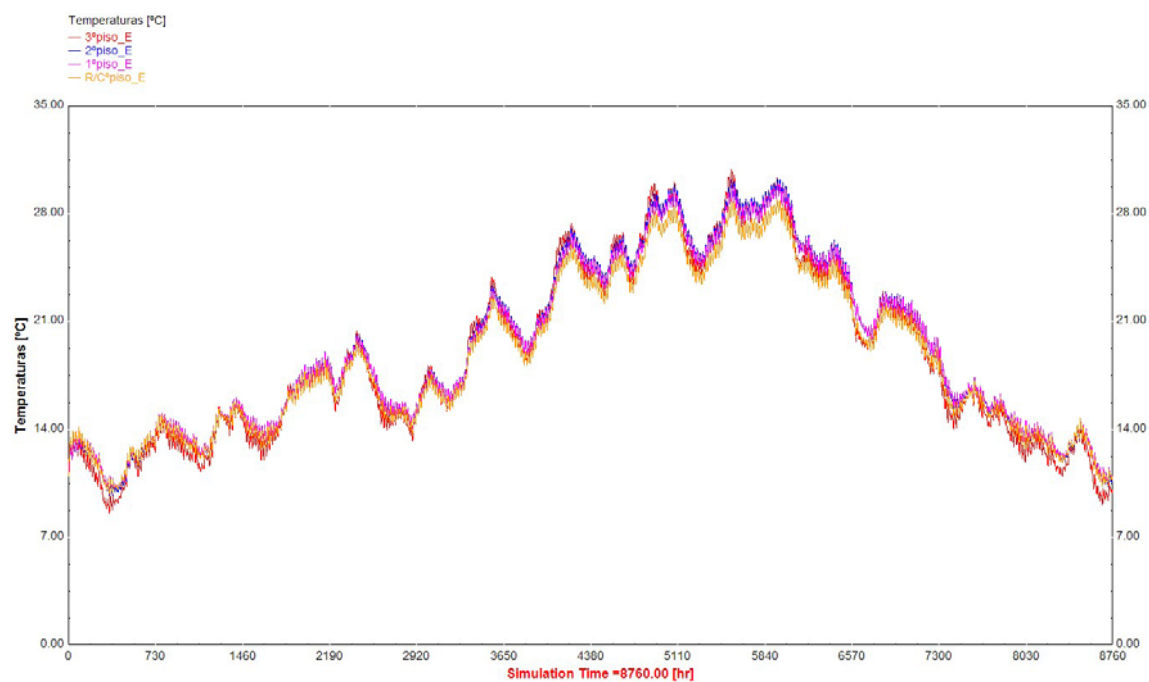


Figura 62: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Castelo Branco

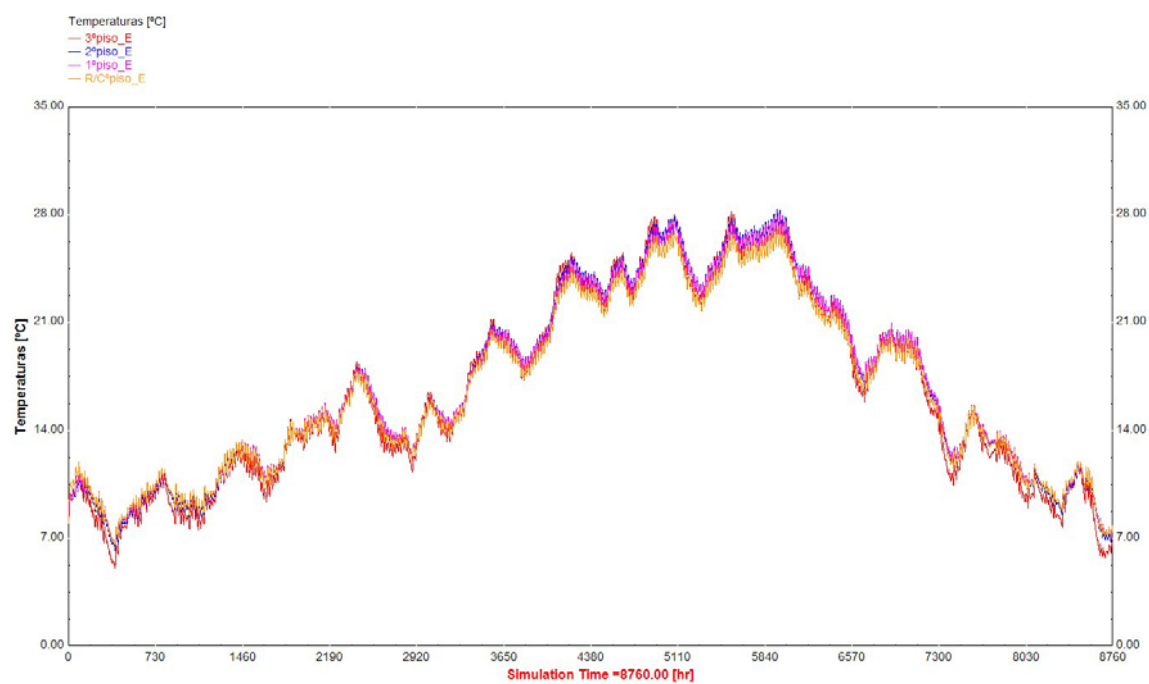


Figura 63: Comportamento térmico do edifício multifamiliar em regime "free float", em Bragança

ANEXO E: Variação das necessidades energéticas para climatização dos apartamentos de cada um dos pisos do edifício multifamiliar, nas localizações estudadas

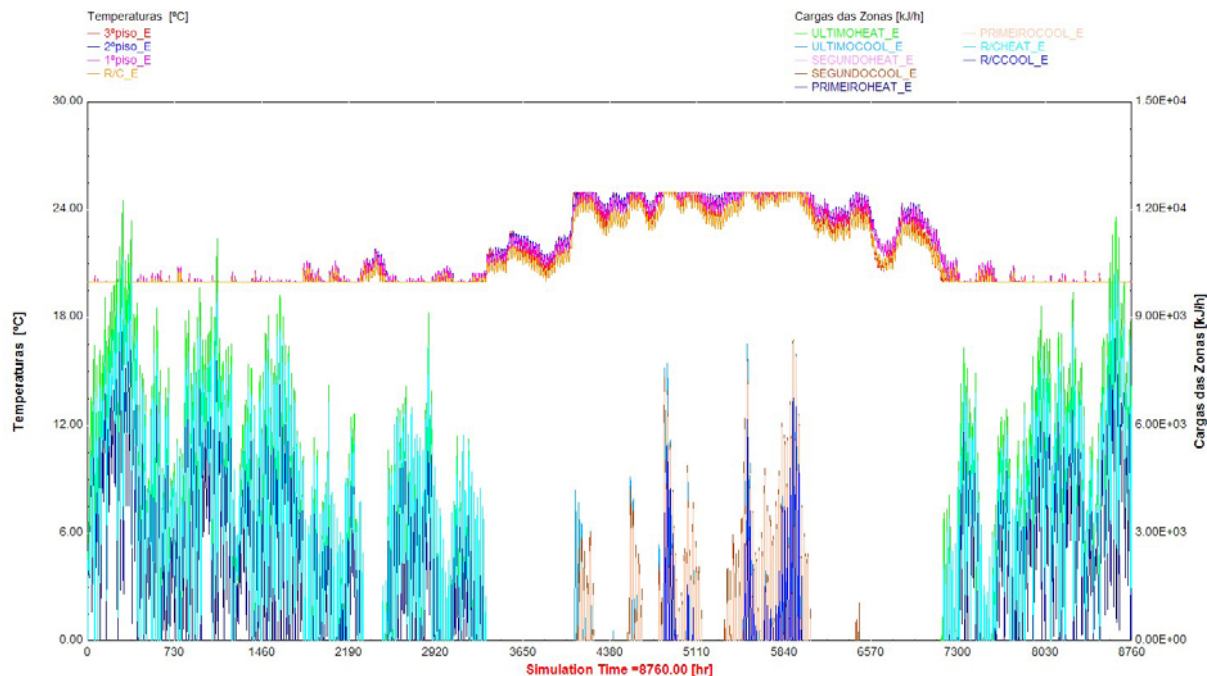


Figura 64: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Coimbra

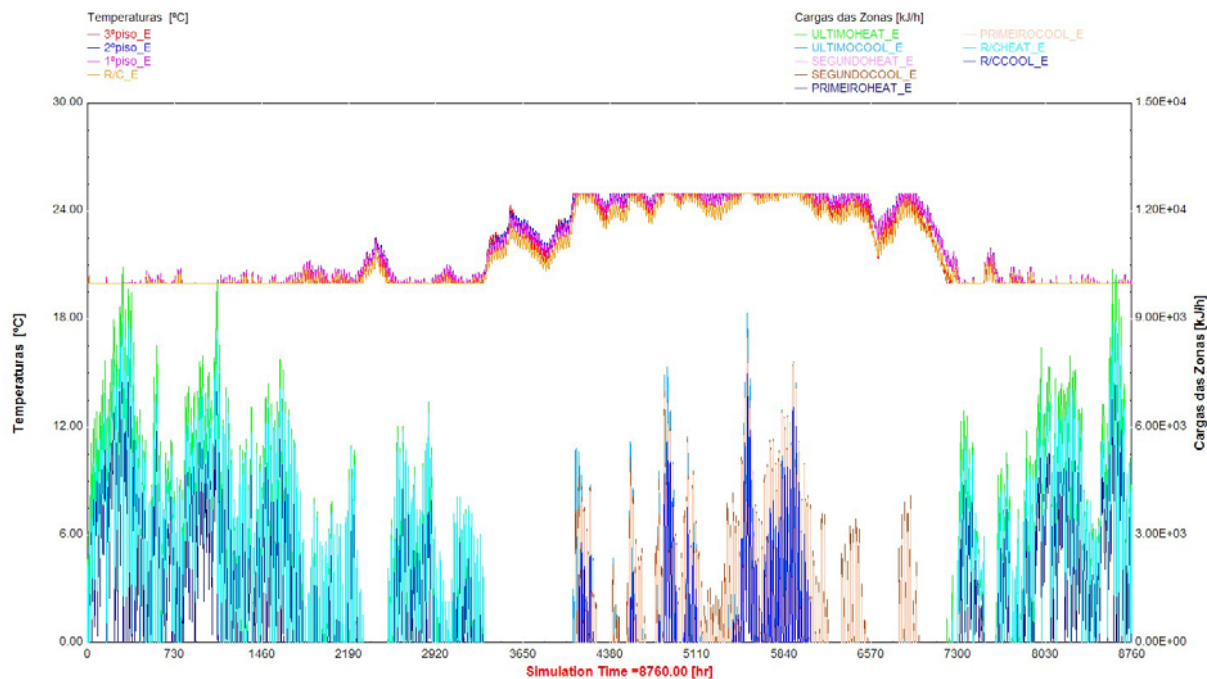


Figura 65: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Lisboa

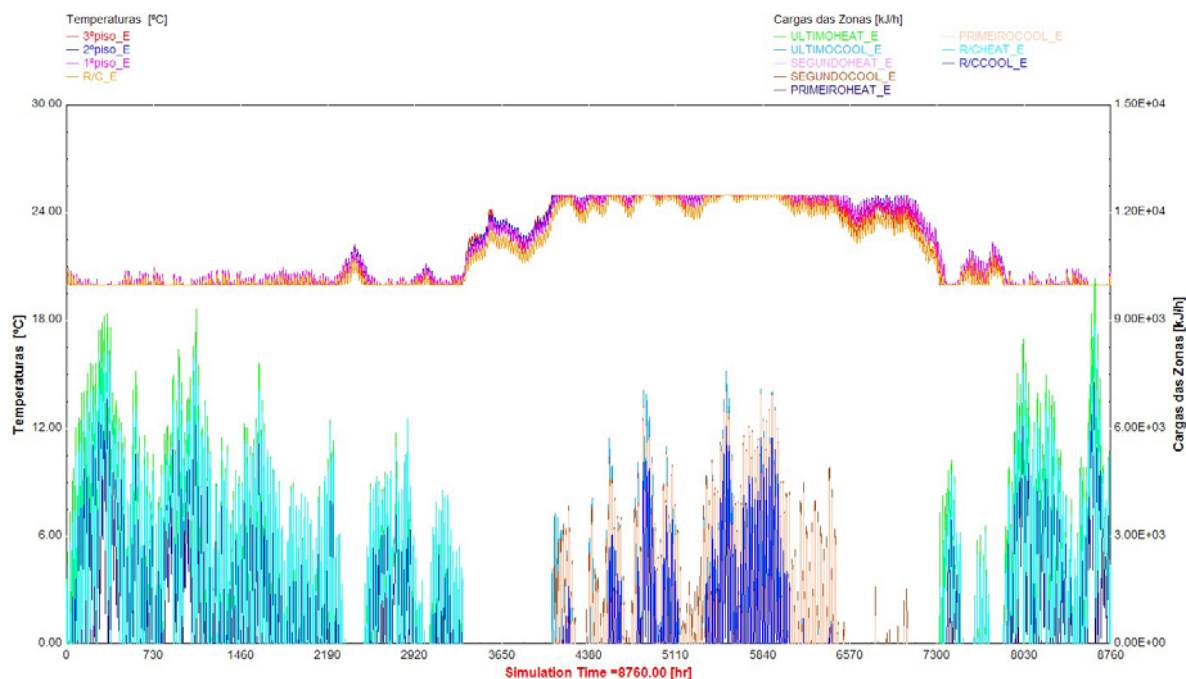


Figura 66: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Faro

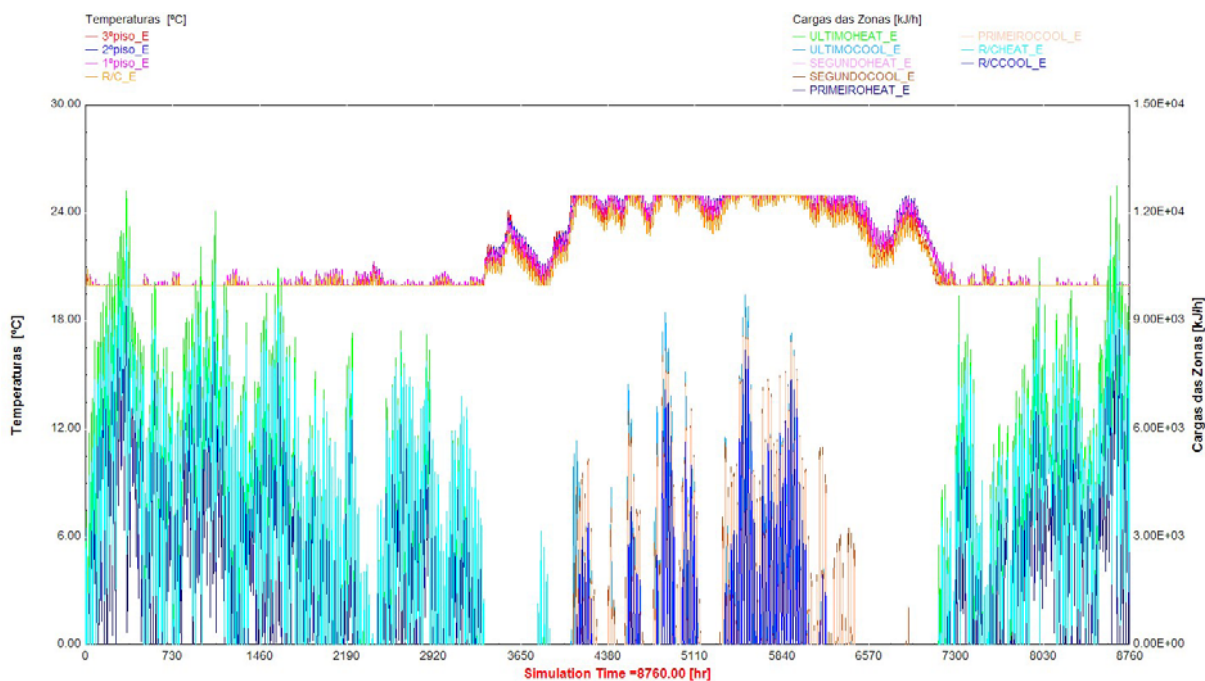


Figura 67: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Évora

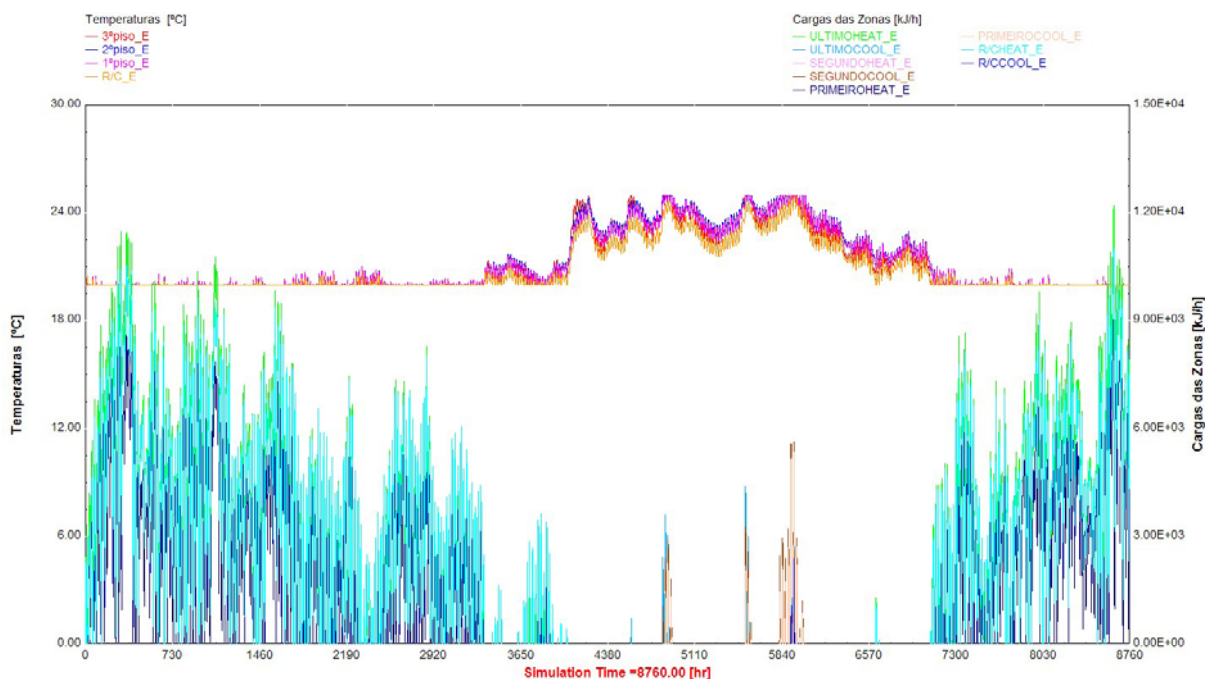


Figura 68: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, no Porto

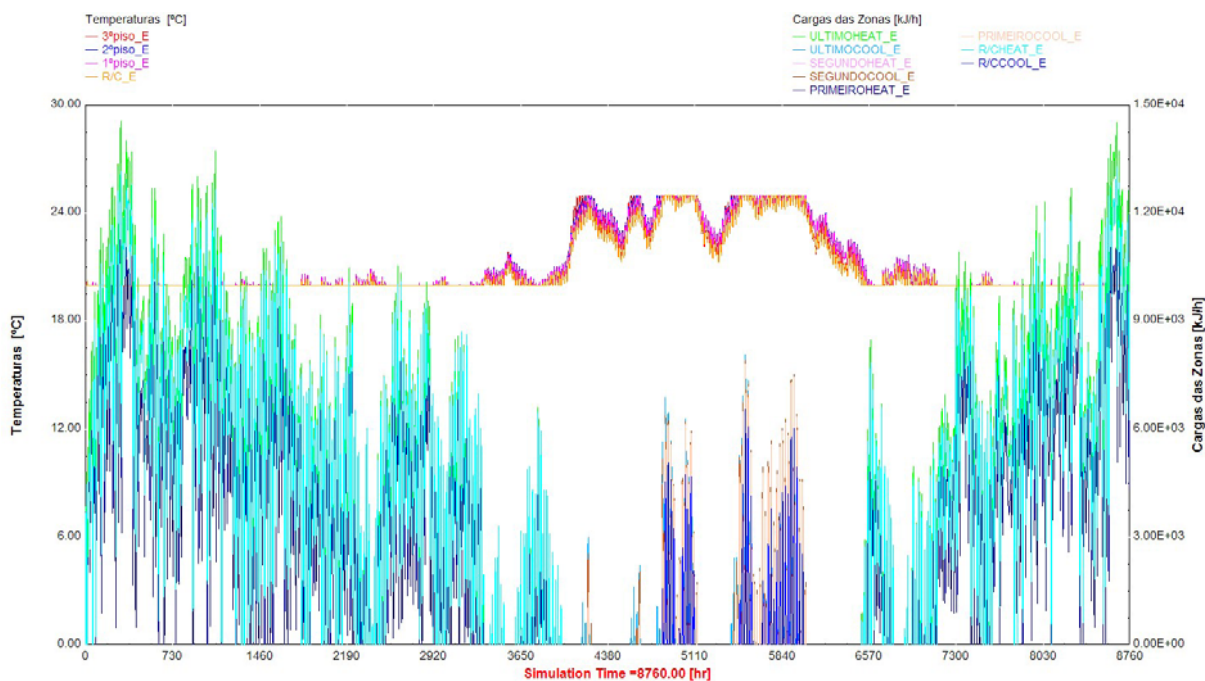


Figura 69: Necessidades energéticas para climatização dos apartamentos do edifício multifamiliar, em Bragança

ANEXO F: Variação das necessidades energéticas para climatização do edifício multifamiliar, nas localizações estudadas

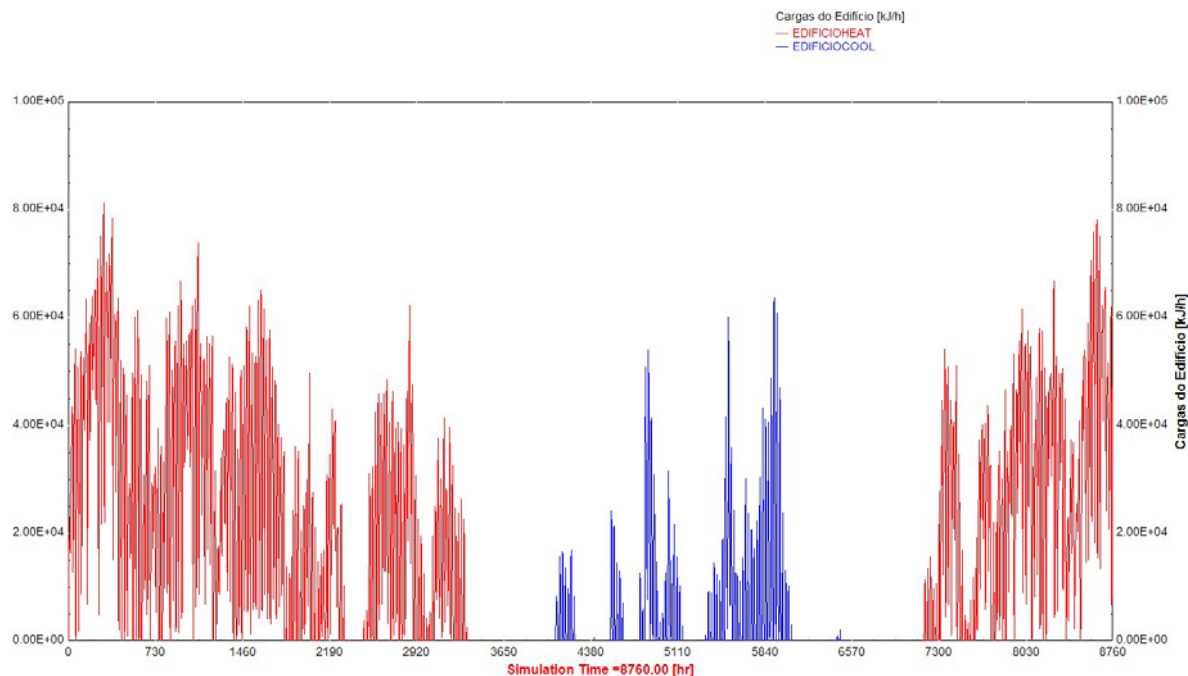


Figura 70: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Coimbra

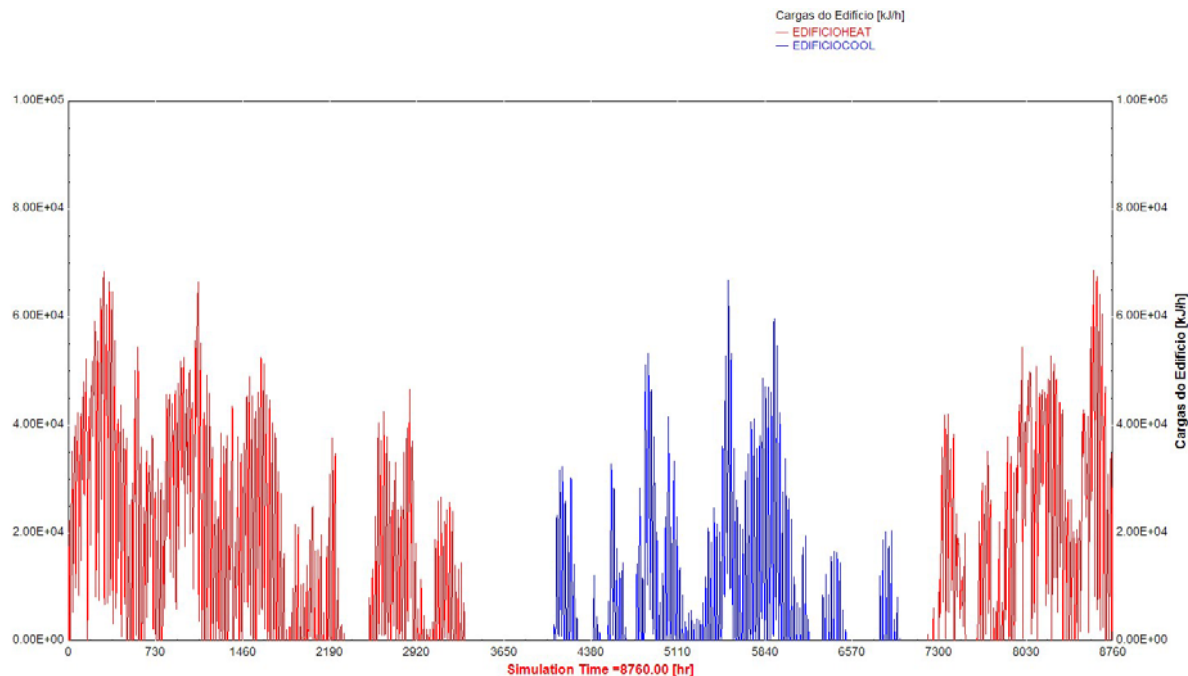


Figura 71: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Lisboa

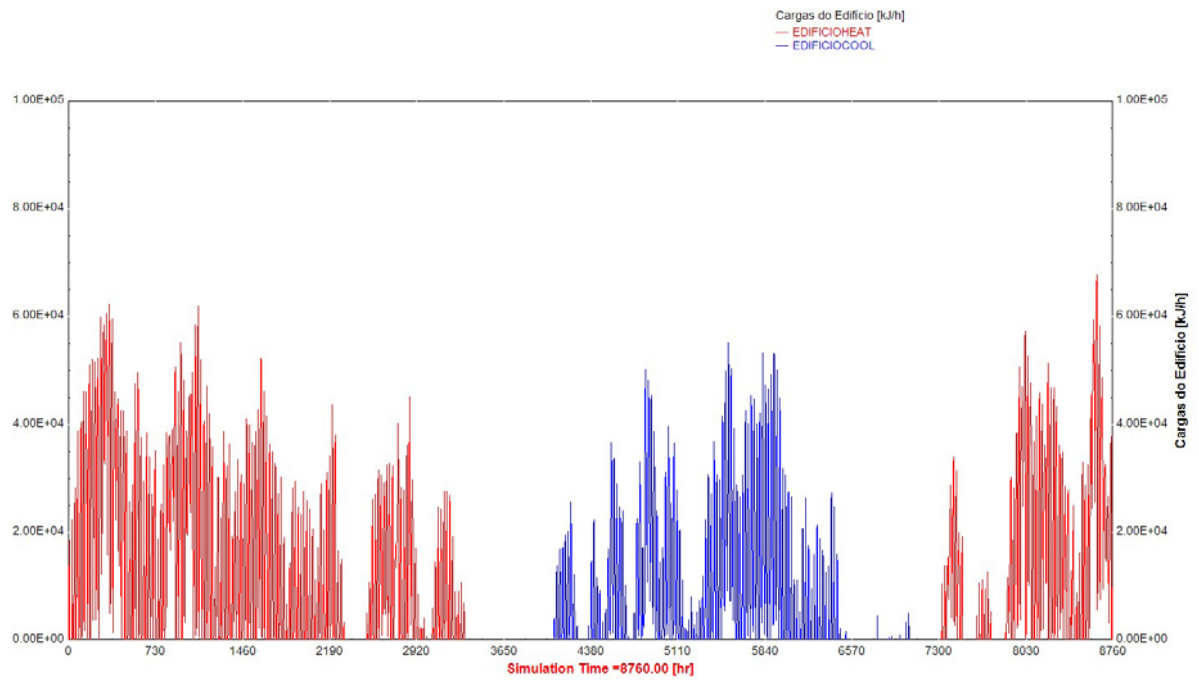


Figura 72: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Faro

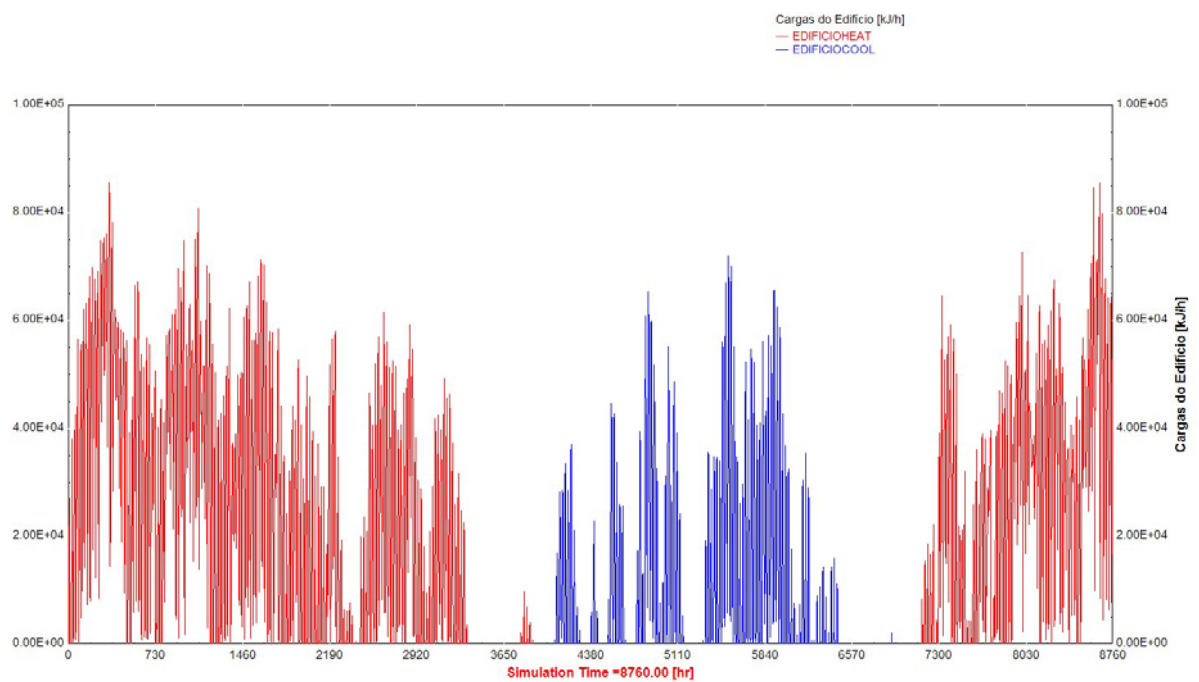


Figura 73: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Évora

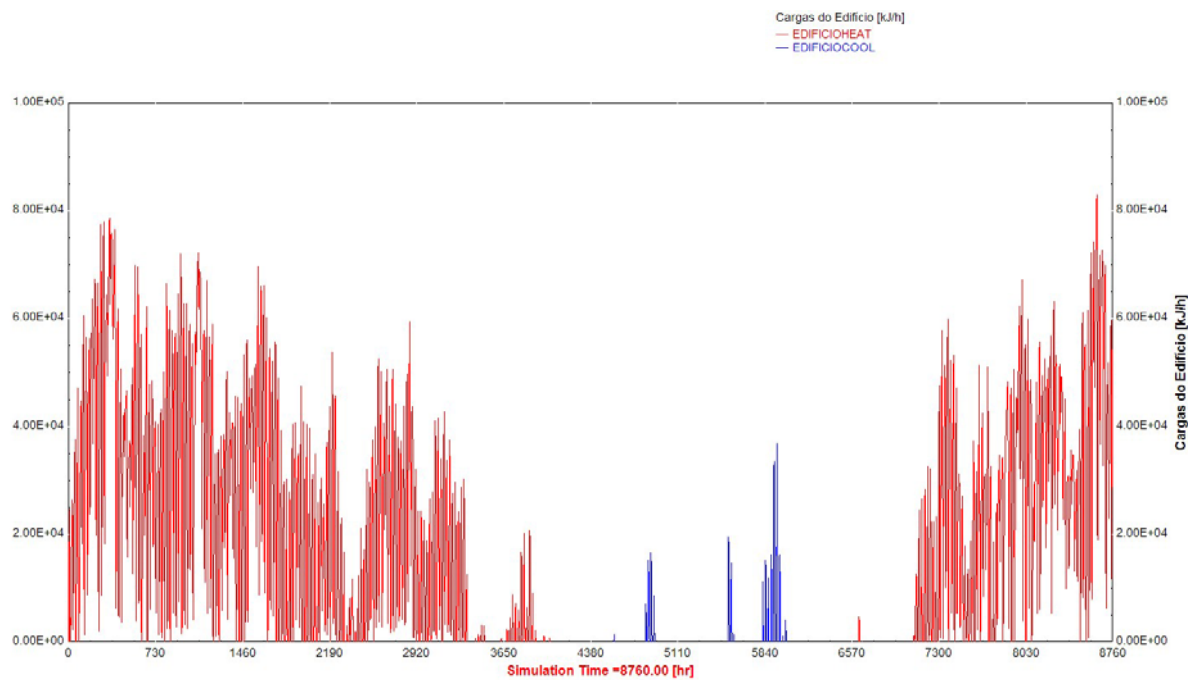


Figura 74: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, no Porto

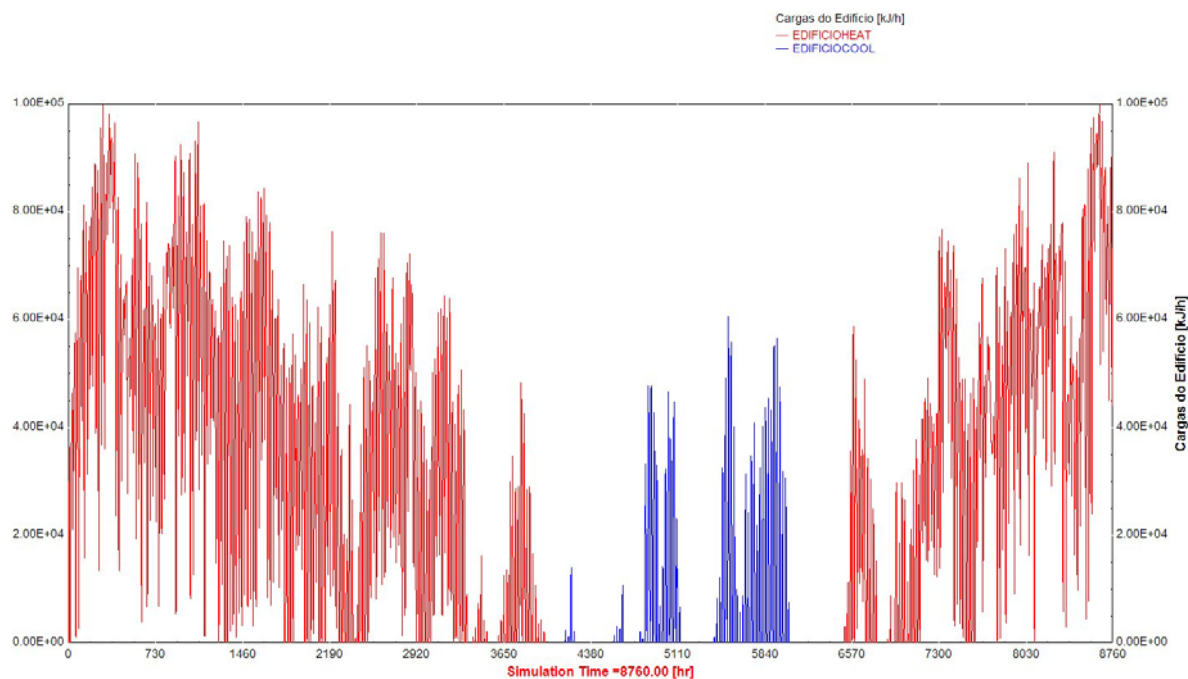


Figura 75: Necessidades energéticas de climatização do edifício multifamiliar, em Bragança

ANEXO G: Necessidades energéticas totais (AQS e climatização) do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através do solar térmico com uma área instalada de 64 m² de SPS e STV, nas localizações estudadas

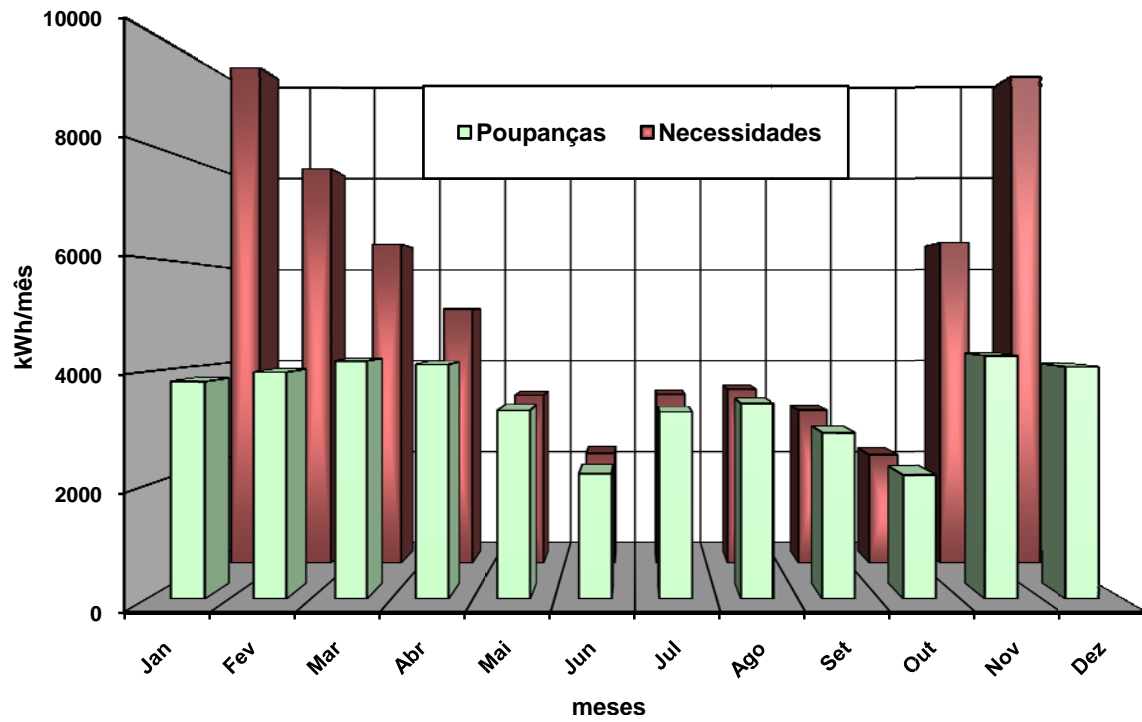


Figura 76: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Coimbra

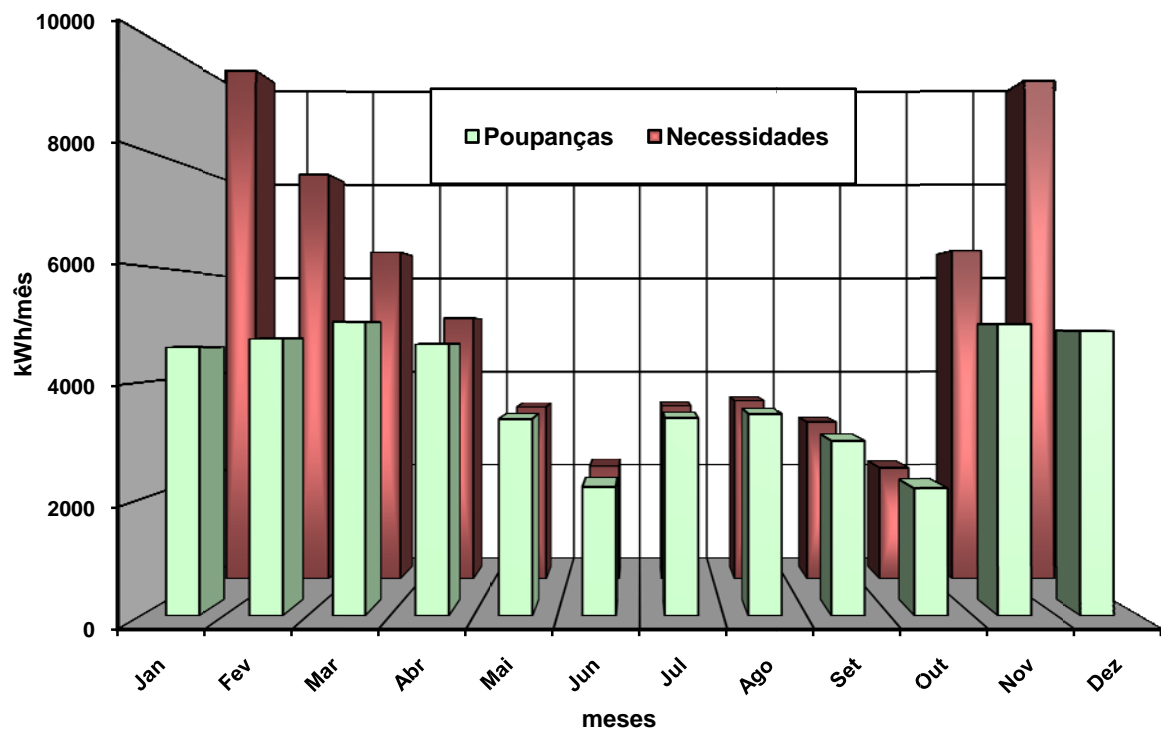


Figura 77: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Coimbra

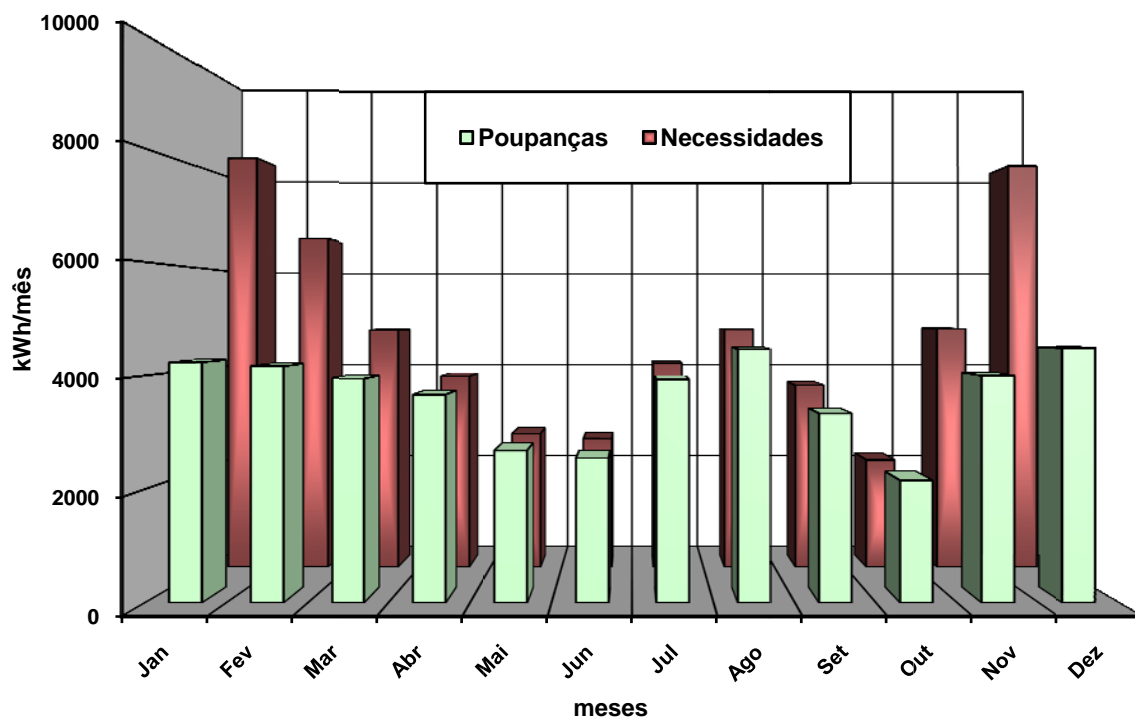


Figura 79: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Lisboa

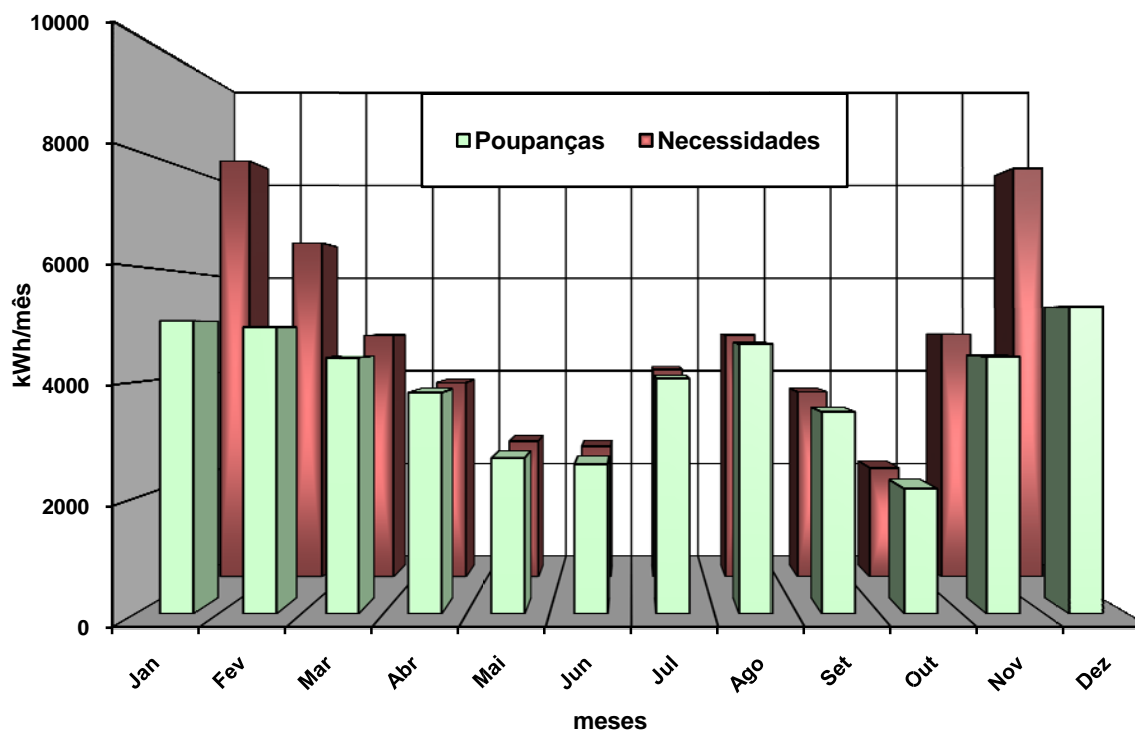


Figura 78: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Lisboa

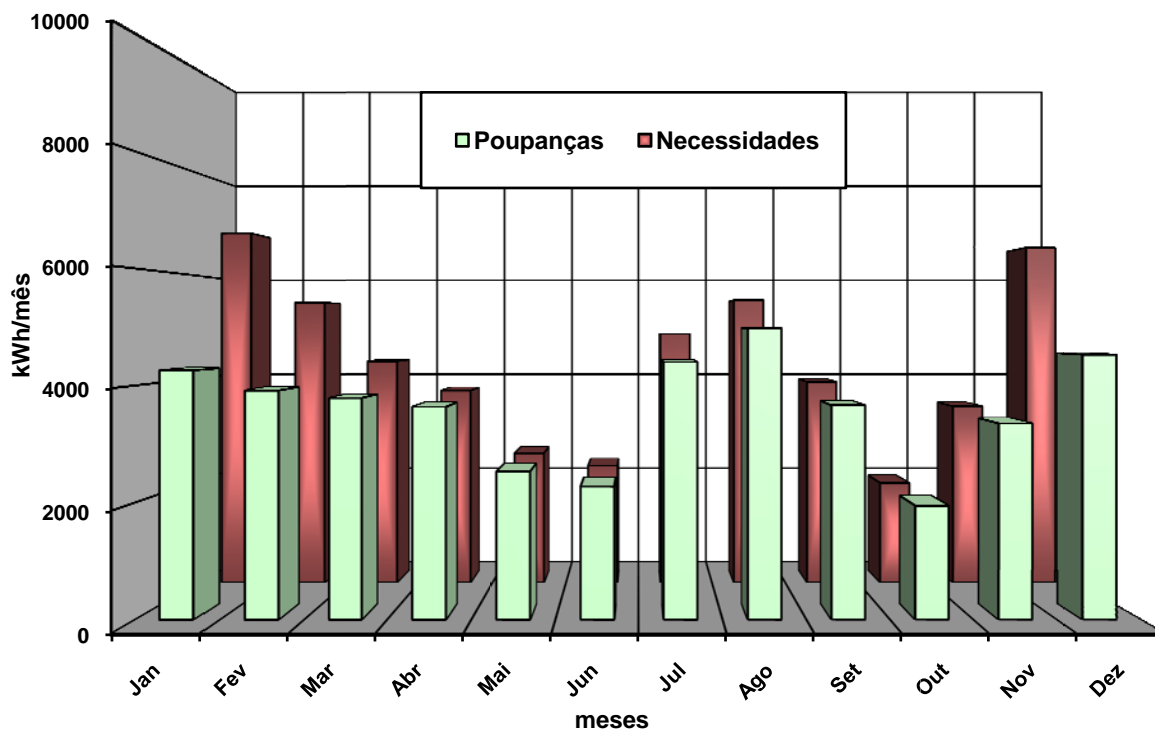


Figura 81: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Faro

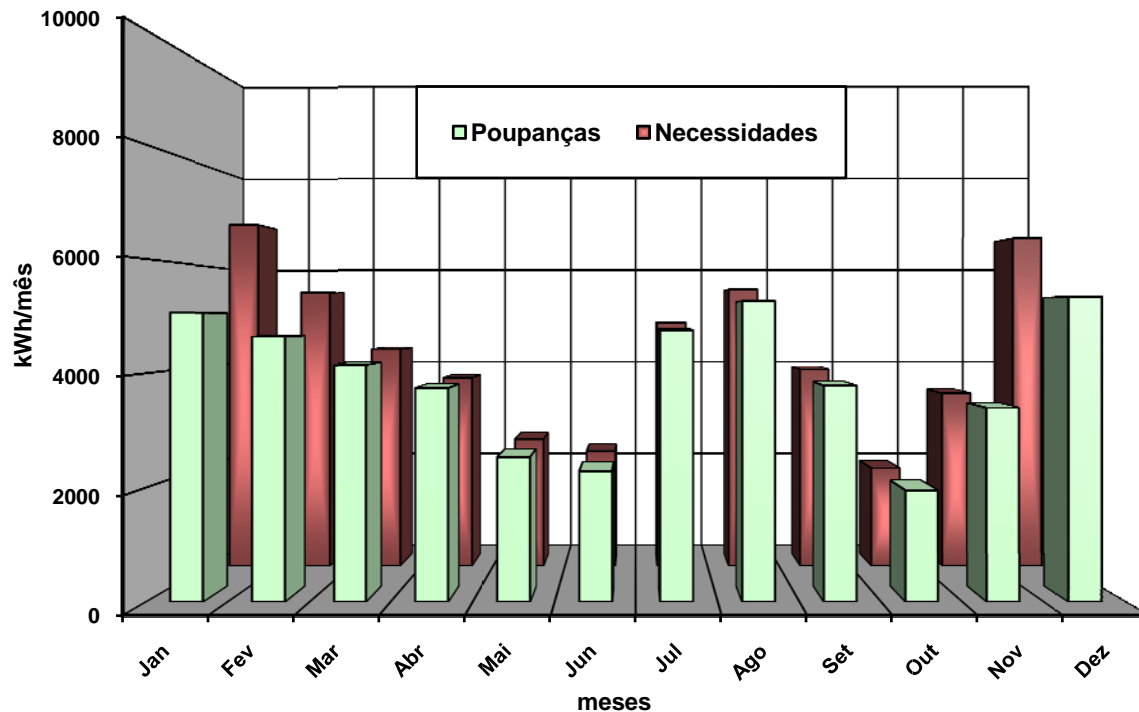


Figura 80: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Faro

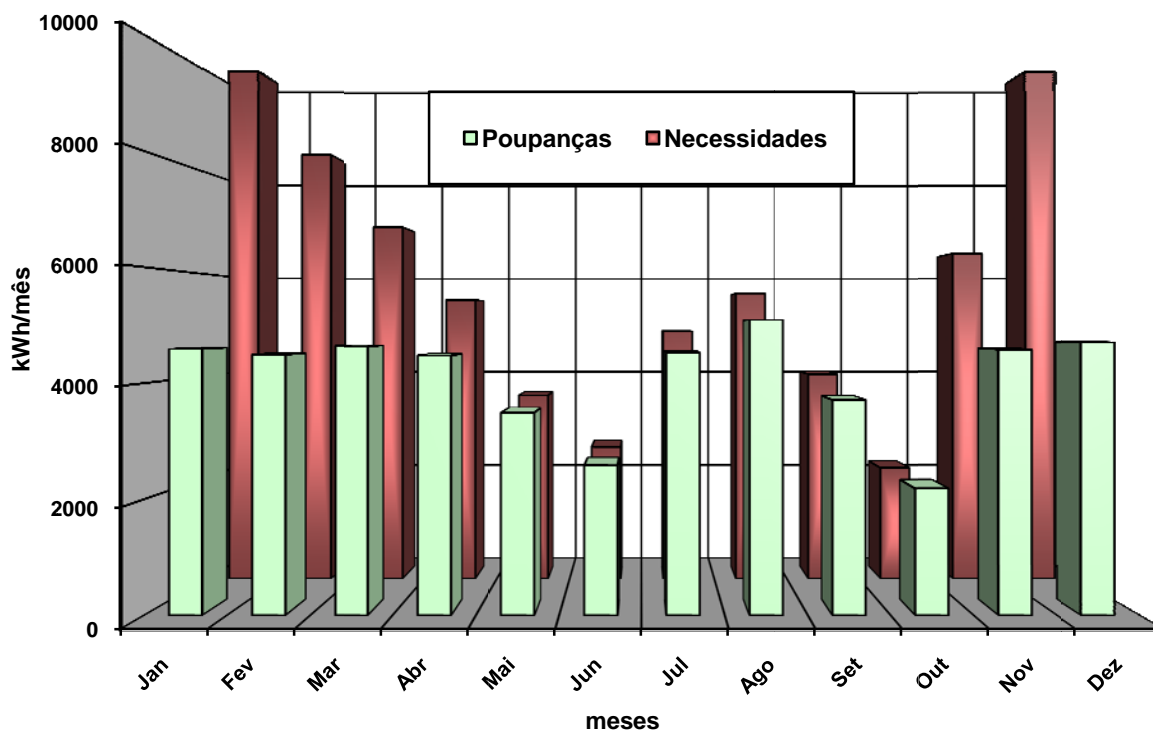


Figura 82: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Évora

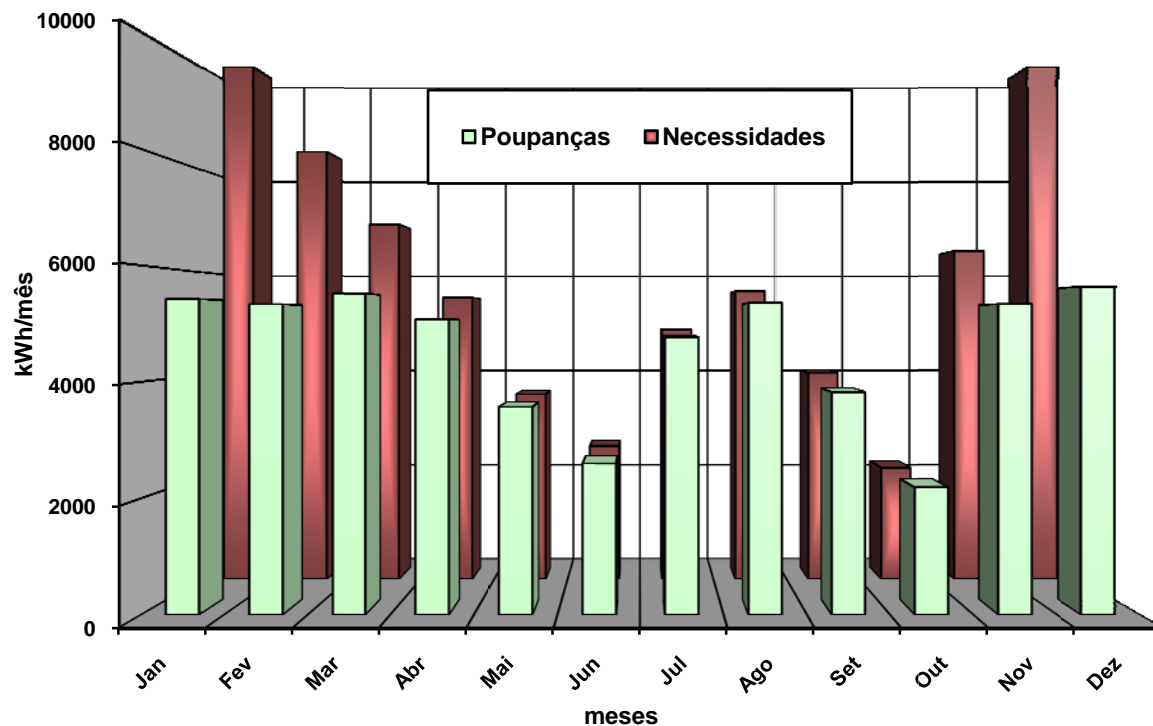


Figura 83: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Évora

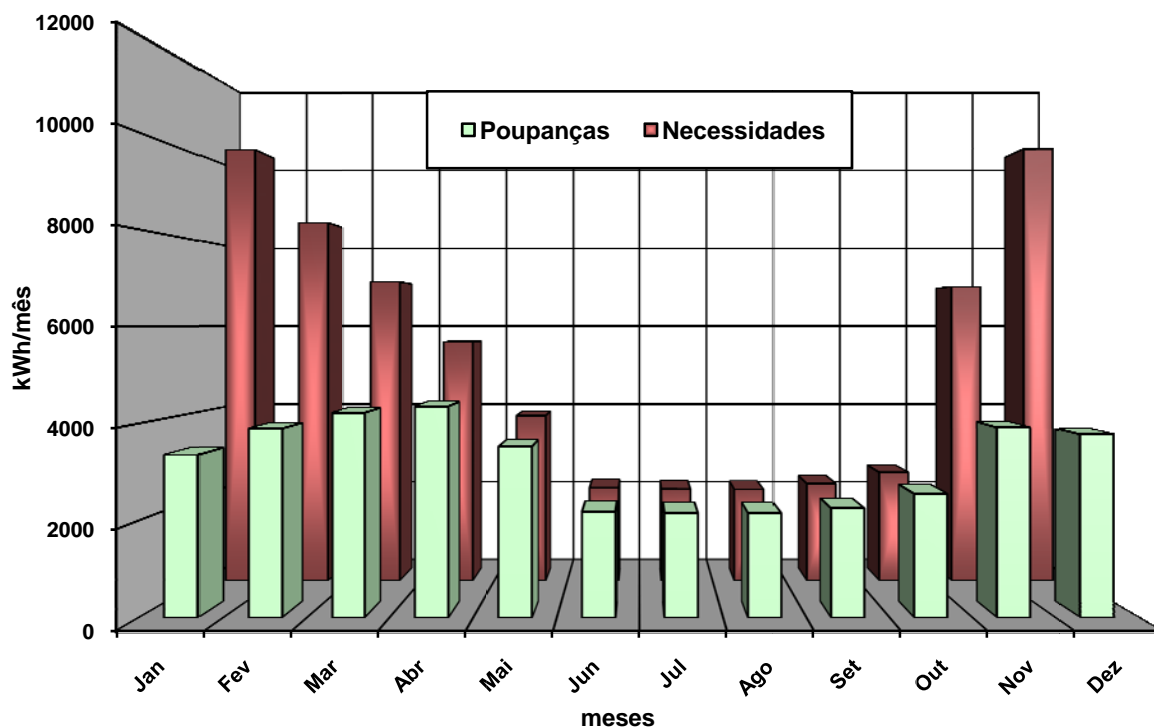


Figura 85: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, no Porto

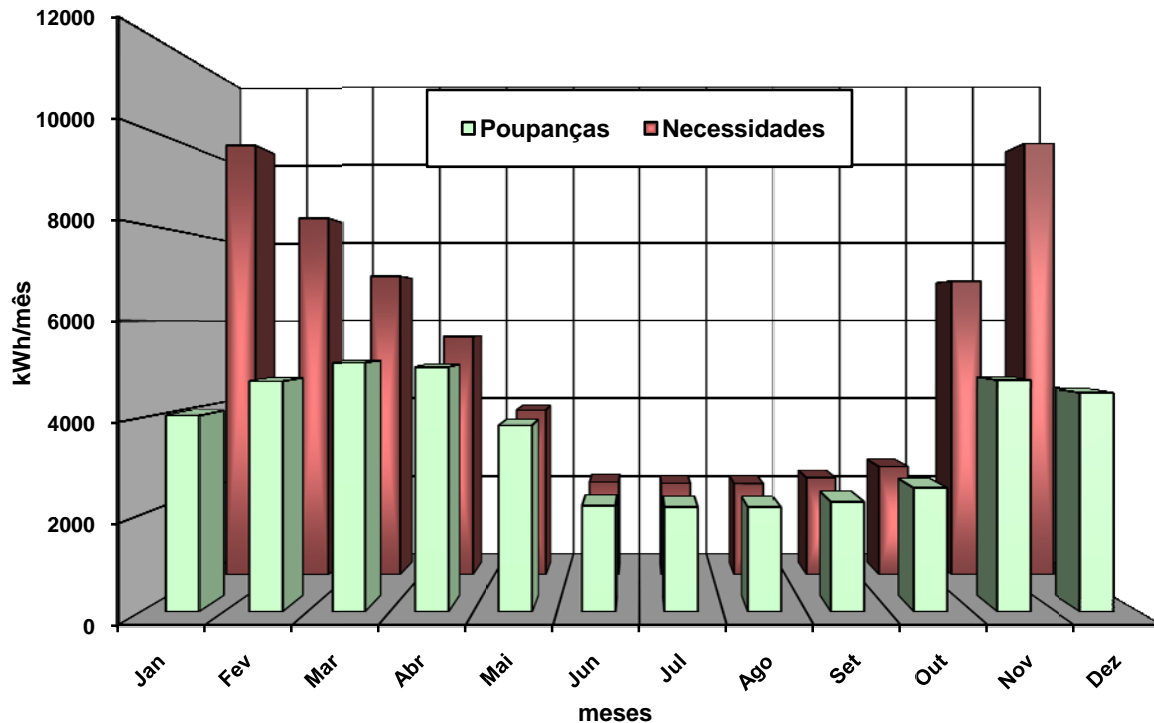


Figura 84: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, no Porto

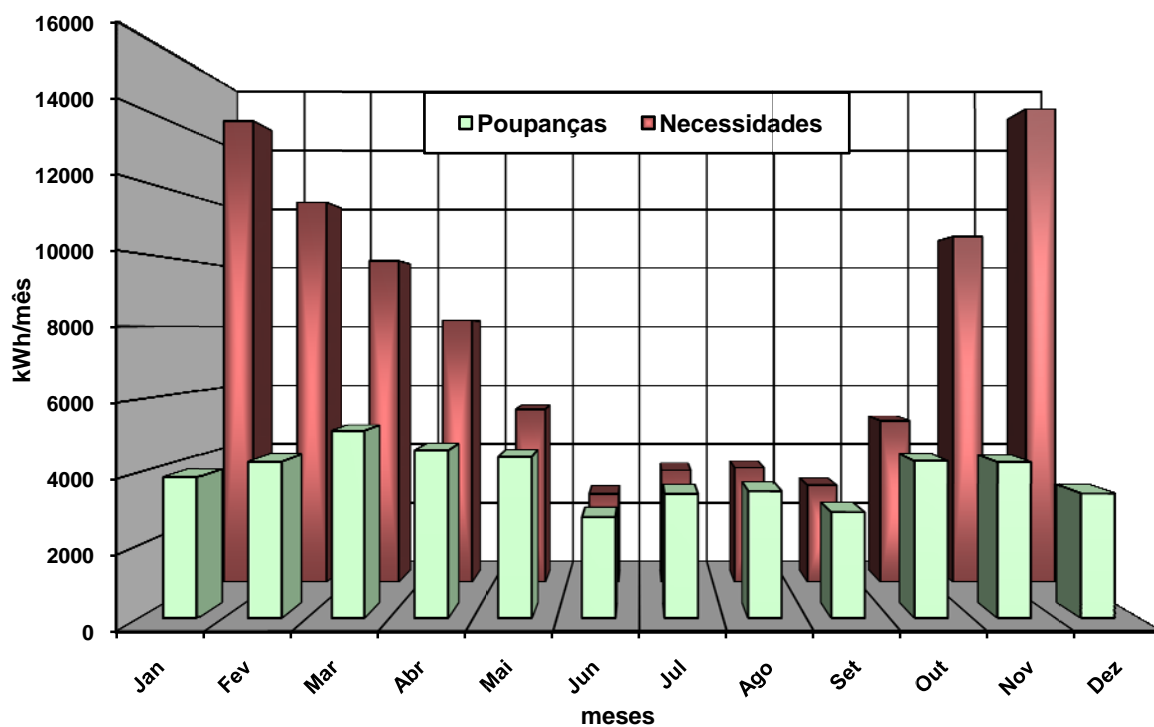


Figura 86: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de SPS, em Bragança

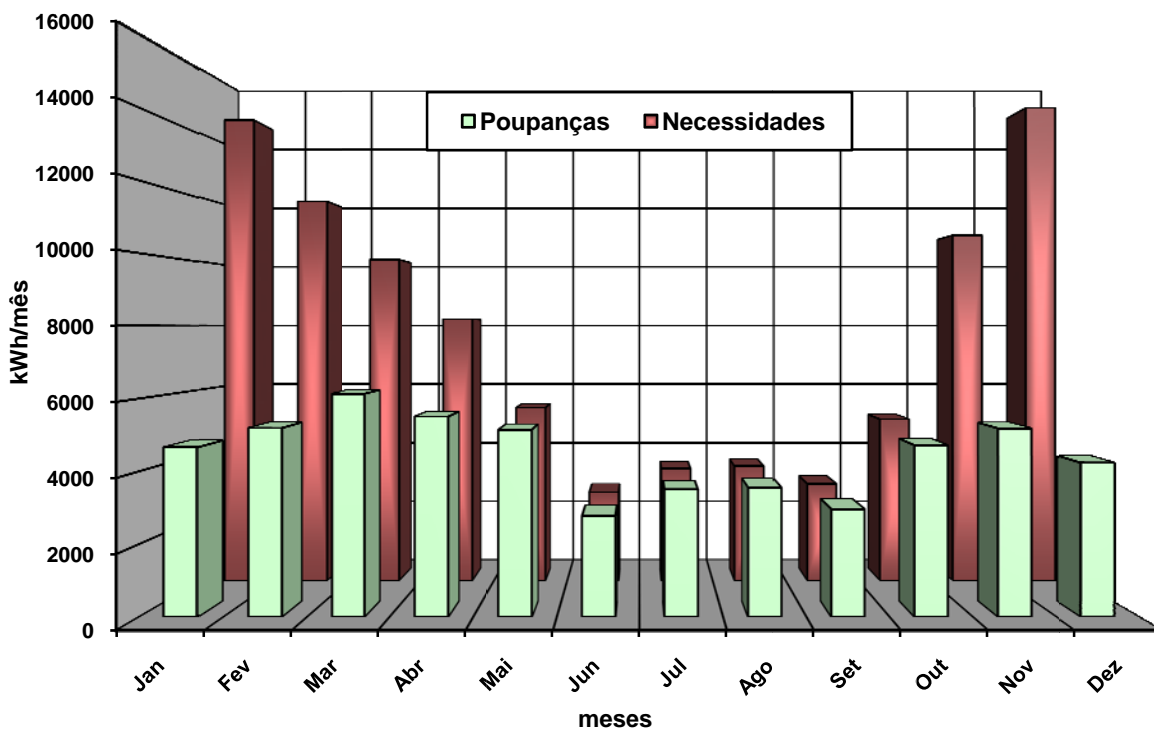


Figura 87: Necessidades energéticas totais do edifício multifamiliar, e poupanças energéticas obtidas através de STV, em Bragança

ANEXO H - Contributo solar mensal de AQS, aquecimento e arrefecimento, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando uma área de 64 m² de SPS e STV, instalados no edifício multifamiliar

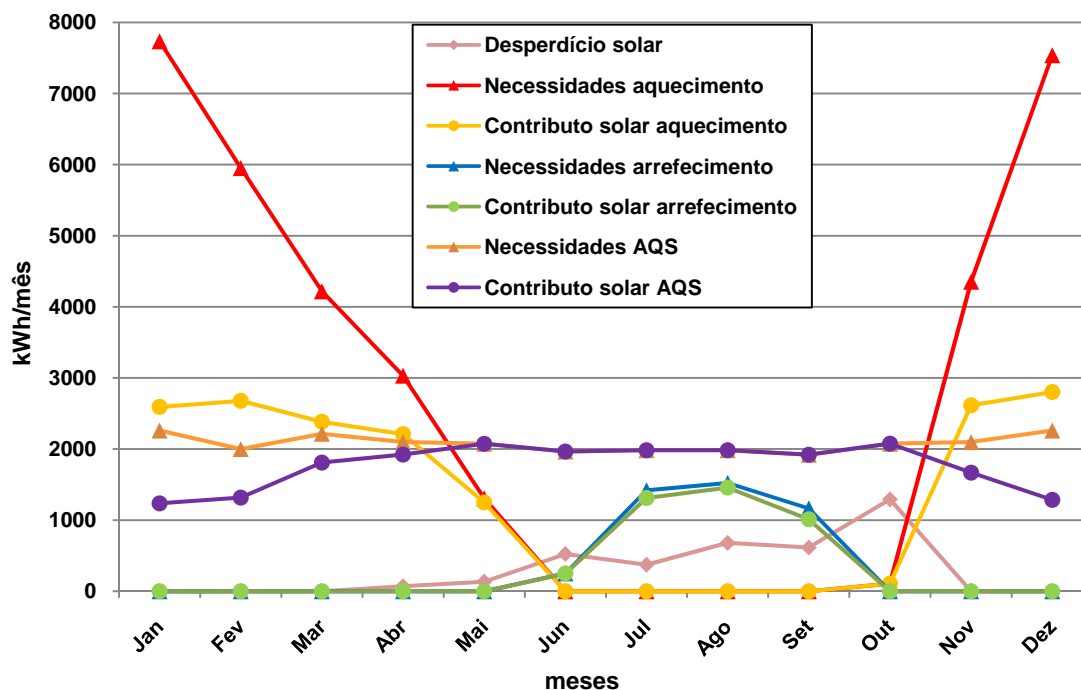


Figura 89: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Coimbra

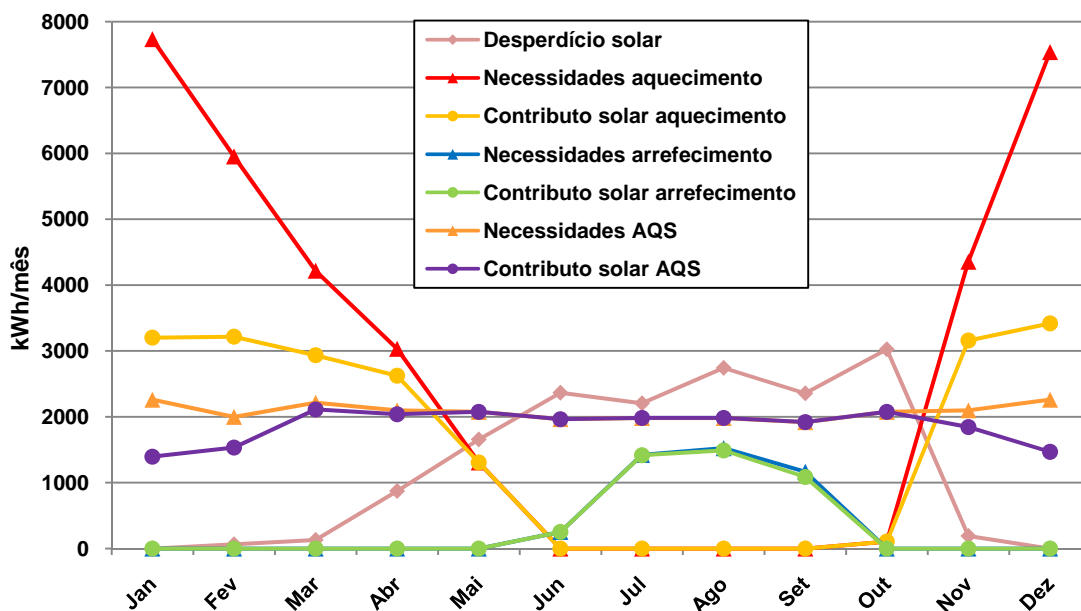


Figura 88: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Coimbra

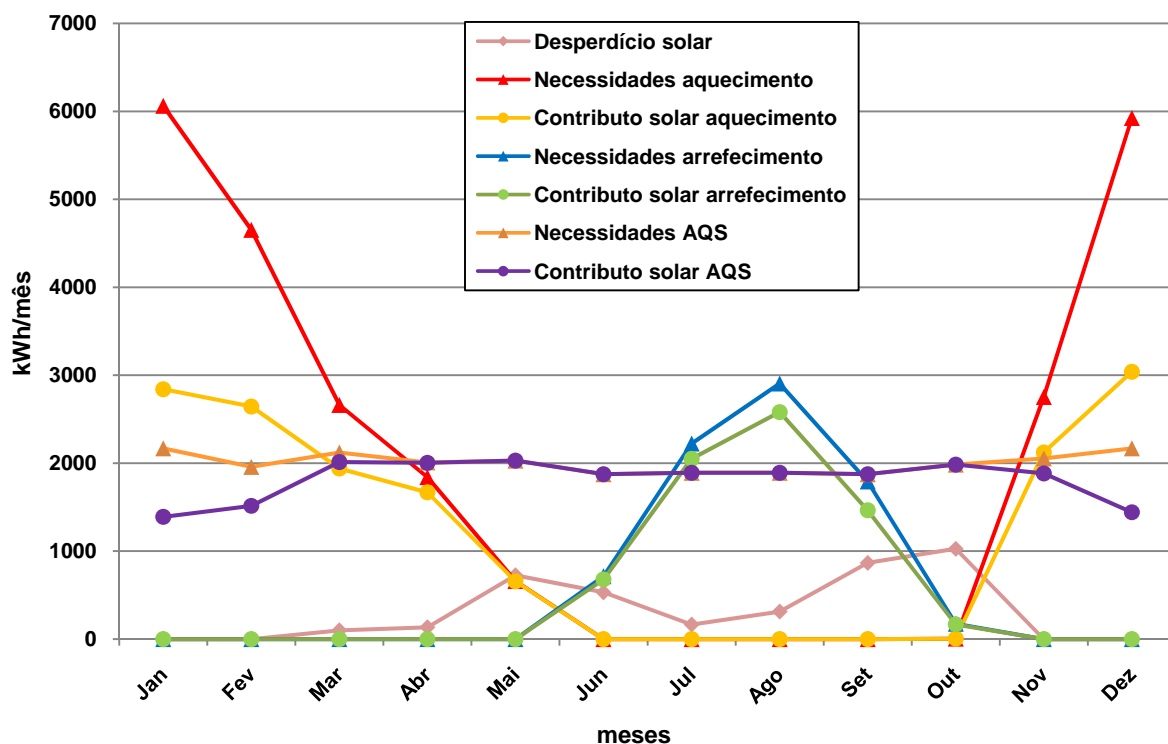


Figura 91: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Lisboa

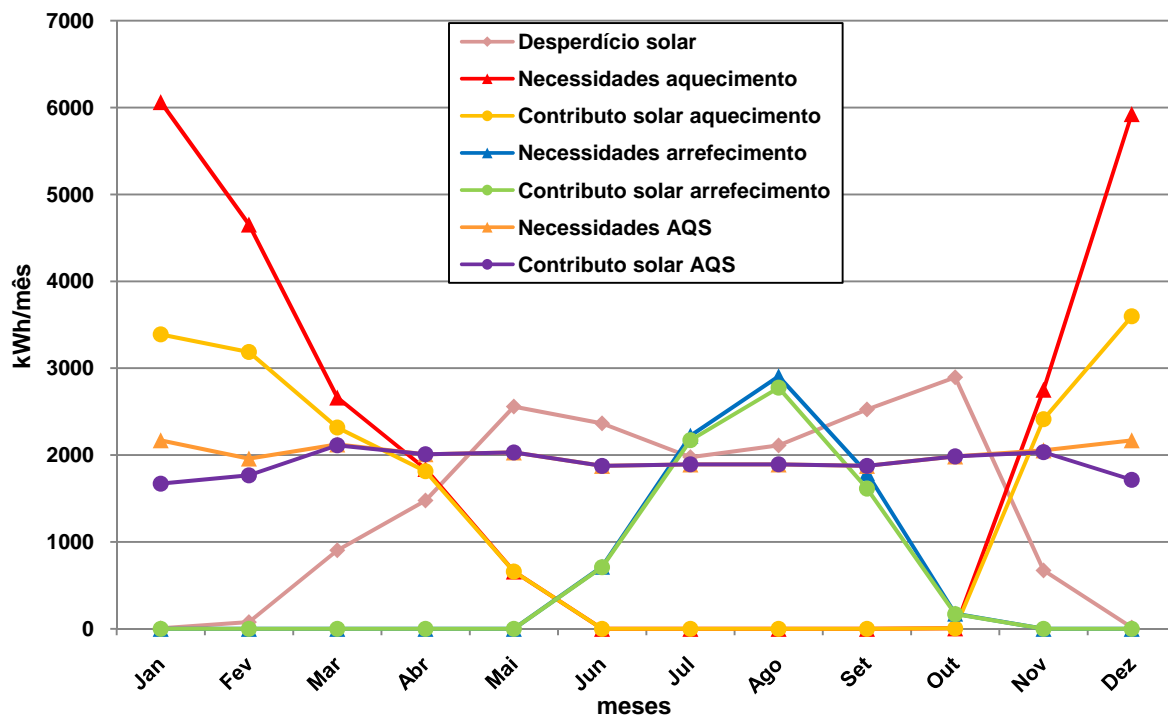


Figura 90: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Lisboa

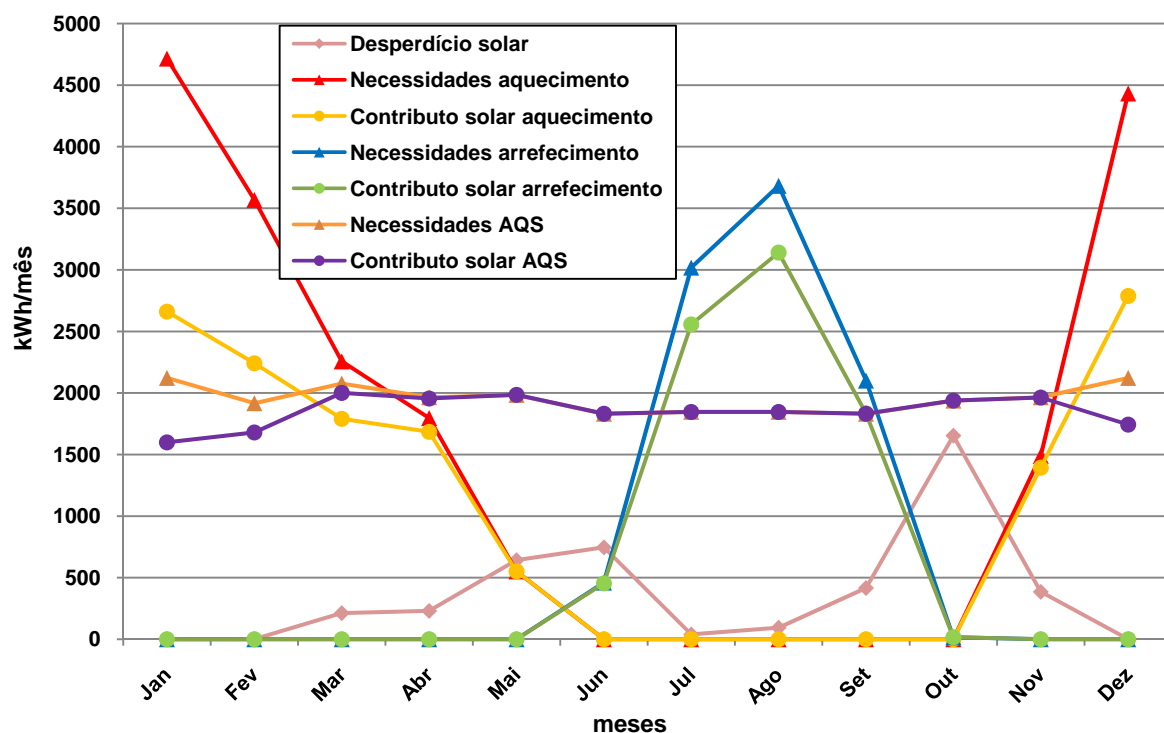


Figura 93: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Faro

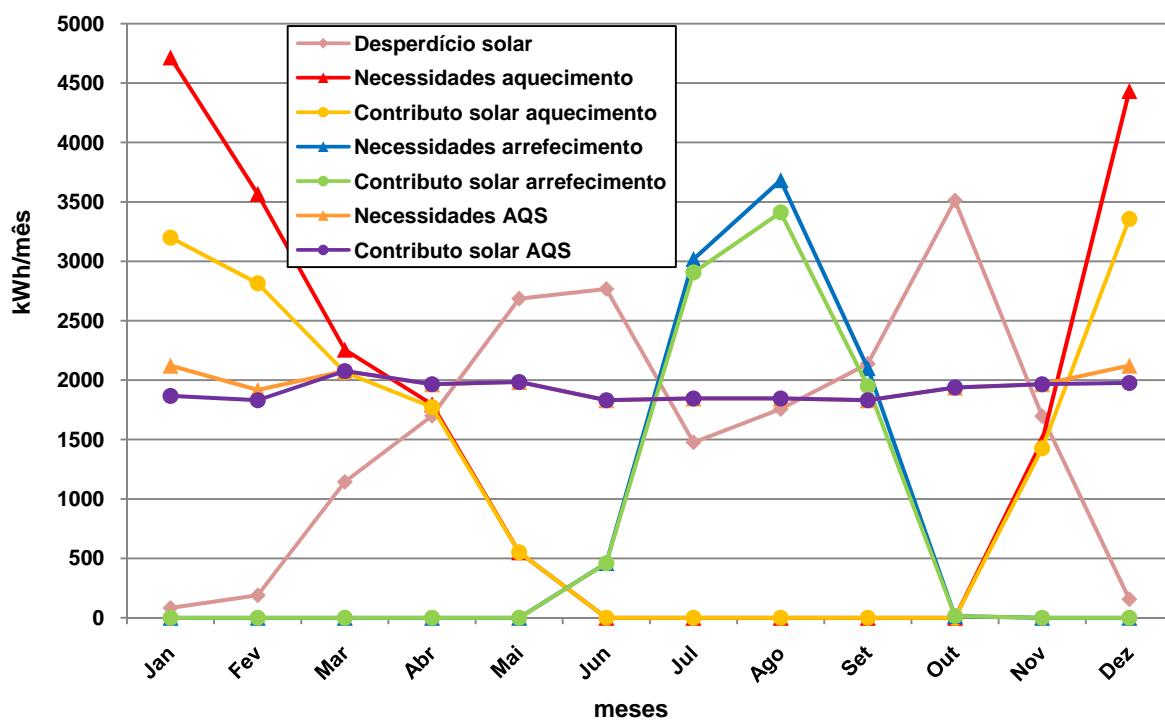


Figura 92: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Faro

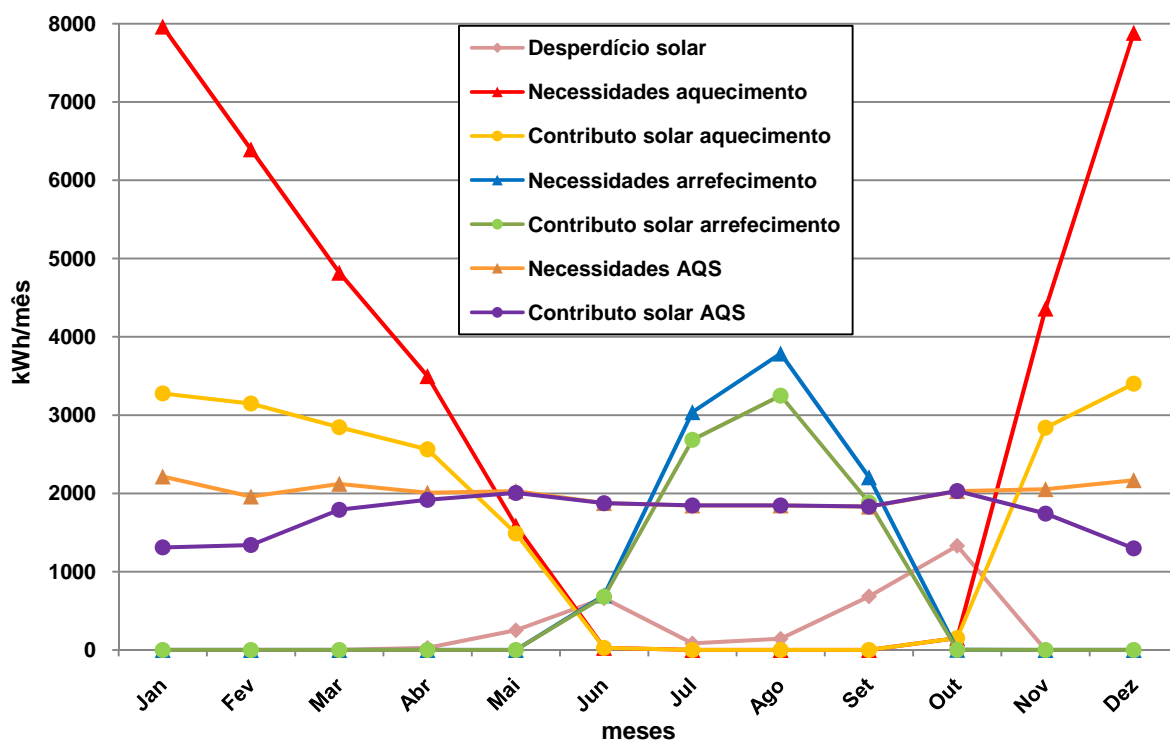


Figura 95: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Évora

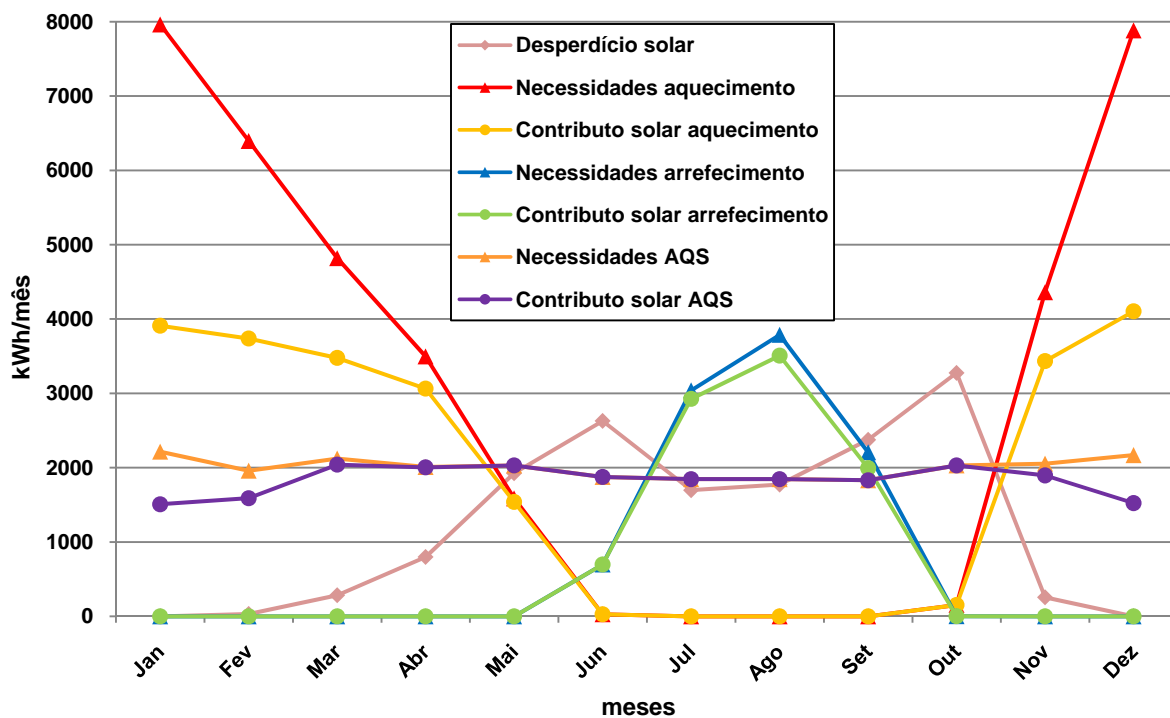


Figura 94: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Évora

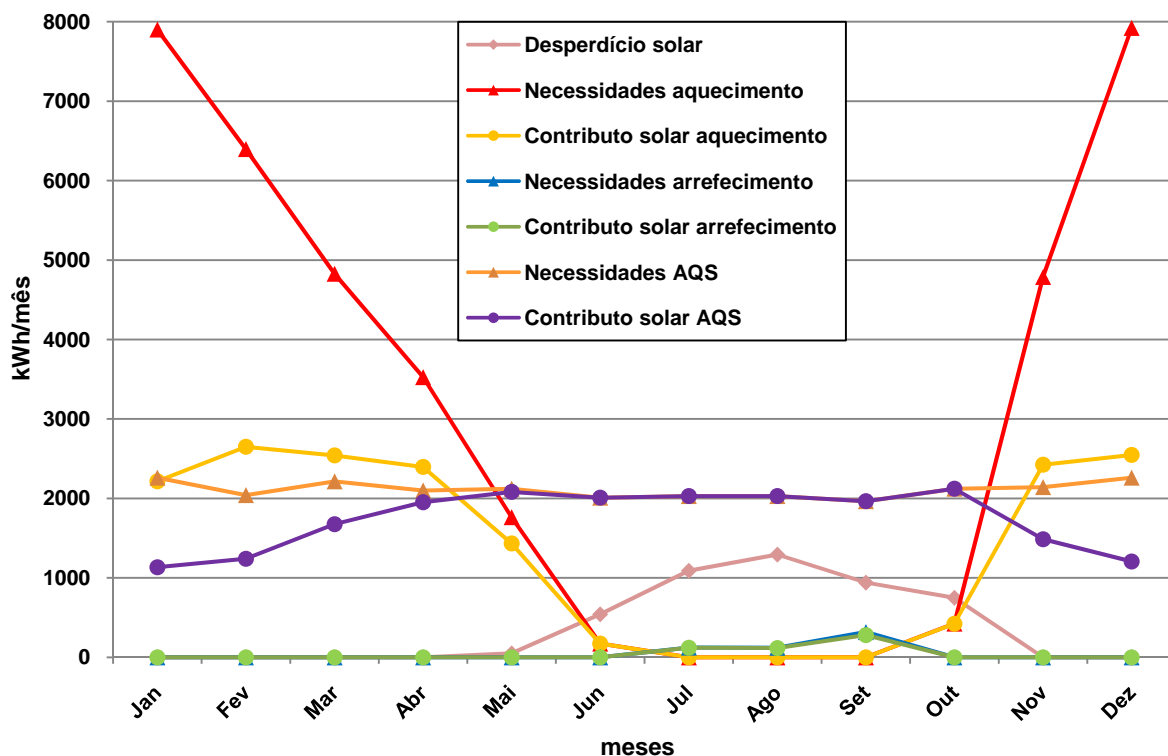


Figura 96: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar no Porto

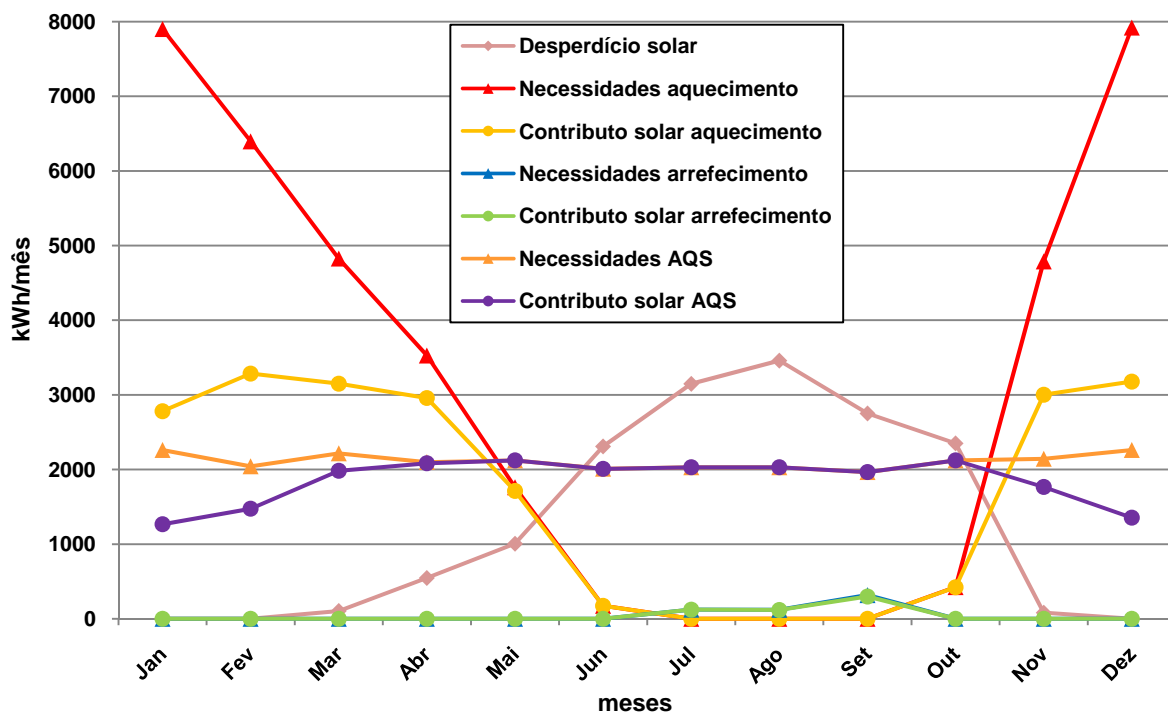


Figura 97: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar no Porto

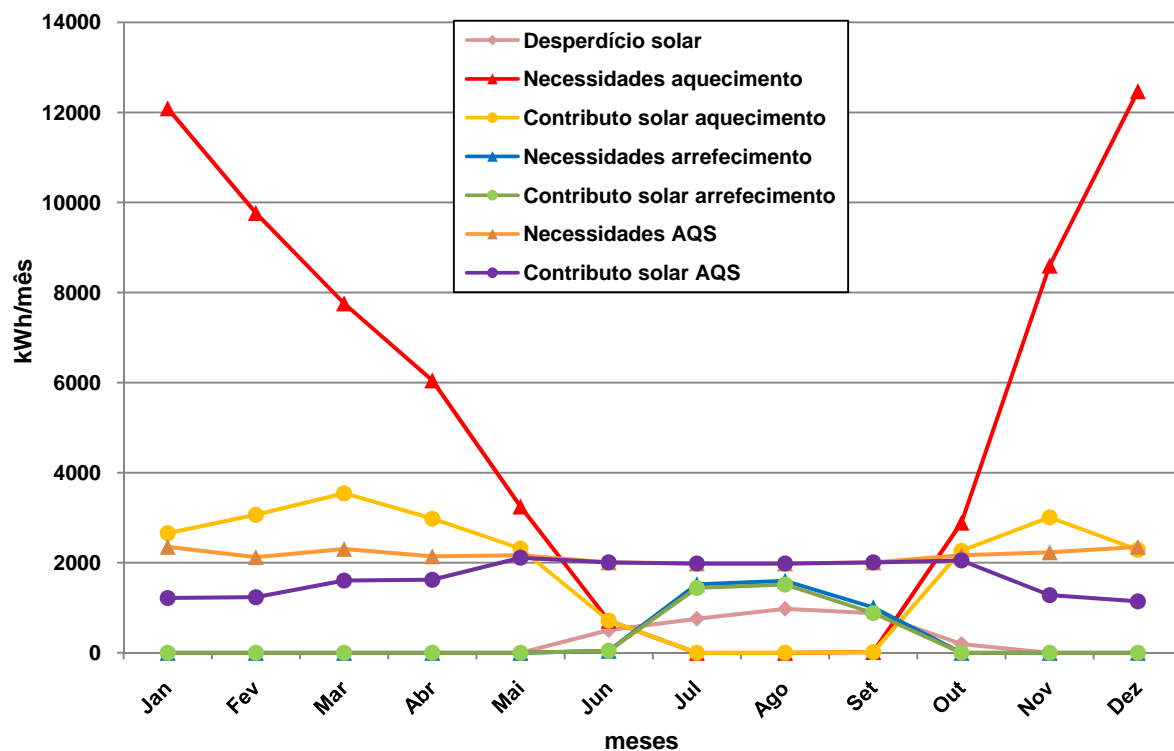


Figura 98: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando SPS instalados no edifício multifamiliar em Bragança

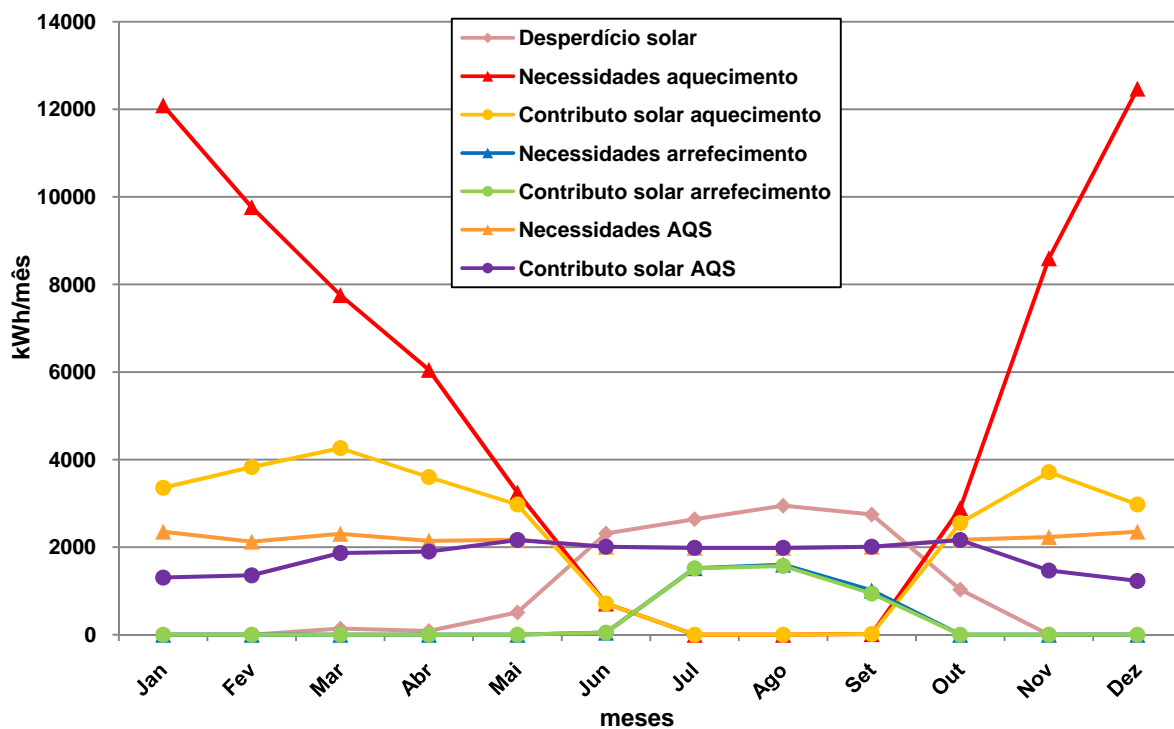


Figura 99: Contributo solar mensal para AQS e climatização, e respectivas necessidades energéticas e desperdício solar, considerando STV instalados no edifício multifamiliar em Bragança